



# Innovationsbericht 2018

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

*Innovation Report 2018*

*Institute of Composite Structures and Adaptive Systems*





## Preface

This year's innovation report focuses on digitalisation. It does not become evident when looking at finished composite structures but there is plenty of "digitalisation" hiding in them. Whether aircraft wings, rotor blades of wind turbines or vehicle components: economic and quality-assured production of lightweight composite structures is not possible without digitalisation.

You may look it up in this innovation report: novel measuring methods, the digital twin in production, new assembly concepts, assistance systems for the maintenance of structures in operation, automated structural monitoring, process simulations, or inline quality assurance. The increasingly precise and faster simulation of design variants in a multidisciplinary design process and all individual production processes for determining robust and economical solutions, automation of production, virtual testing and virtual assembly play a decisive role. The end-to-end documentation of components in their formation process and during operation with the aid of the digital twin becomes a standard procedure.

Hence, the motto of this year's Science Day is:

„From the virtual product to the digital twin – Composite Structures 4.0“

The articles in this innovation report and the lectures delivered at the Science Day 2018 provided for download on our website give an impression of the wide range of options we have been able to exploit over the past years for efficient and adaptive production of lightweight composite structures in conjunction with new measurement and simulation methods and the use of digital technologies.

Get inspired. In our "DLR Wissenswelt Leichtbau®" in the Lilienthalhaus at Braunschweig Airport, we will be glad to contribute all our competences in discussions with you on new lightweight construction solutions precisely meeting your requirements. Please do not hesitate to contact us.

## Vorwort

Unser diesjähriger Innovationsbericht steht im Zeichen der Digitalisierung. Man sieht es den fertigen Faserverbundstrukturen nicht an, aber in ihnen steckt jede Menge „Digitalisierung“. Ob Flugzeugflügel, Rotorblätter von Windkraftanlagen oder Fahrzeugbauteile: ein wirtschaftlicher und qualitätsgesicherter Faserverbundleichtbau ist ohne Digitalisierung nicht möglich.

Sie können es in den Beiträgen dieses Innovationsberichts lesen: neuartige Messmethoden, der digitale Zwilling in der Produktion, neue Montagekonzepte, Assistenzsysteme für die Wartung von Strukturen im Betrieb, automatisierte Strukturüberwachung, Prozesssimulationen oder Inline-Qualitätssicherung. Die immer genauere und schnellere Simulation von Entwurfsvarianten im multidisziplinären Designprozess und aller Einzelprozesse einer Produktion für die Bestimmung robuster und wirtschaftlicher Lösungen, die Automation der Fertigung, das virtuelle Testen und die virtuelle Montage spielen eine entscheidende Rolle. Die lückenlose Dokumentation von Bauteilen in ihrem Entstehungsprozess und während des operativen Einsatzes mit Hilfe des digitalen Zwillings wird zum Standard.

Das Motto unseres diesjährigen Wissenschaftstages lautet daher:

„Vom virtuellen Produkt zum digitalen Zwilling – Faserverbundleichtbau 4.0“

Die Beiträge dieses Innovationsberichts wie auch die auf unserer Internetseite abrufbaren Vorträge des Wissenschaftstags 2018 geben einen Eindruck von der Spannweite der Möglichkeiten, die wir über die Jahre für den effizienten, adaptiven Faserverbundleichtbau in Zusammenwirken mit neuen Mess- und Simulationsverfahren und der Nutzung digitaler Technologien erschließen konnten.

Lassen Sie sich inspirieren. In unserer DLR Wissenswelt Leichtbau® im Lilienthalhaus am Flughafen Braunschweig stehen wir Ihnen für Gespräche über neue Leichtbaulösungen für Ihren Bedarf mit allen unseren Kompetenzen gerne zur Verfügung. Sprechen Sie uns an.



Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
Institutsdirektor



Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach  
Stellvertretender Institutsdirektor



Prof. Dr.-Ing. Jörg Melcher  
Innovationsmanager



# Inhaltsverzeichnis

## Contents

<b>Das Institut im Überblick</b>	<b>6</b>
<i>The institute in a nutshell</i>	
<b>DLR Wissenswelt Leichtbau®</b>	<b>8</b>
<i>Innovation lab "DLR Wissenswelt Leichtbau®"</i>	
<b>Technologiemarketing auf Messen und Veranstaltungen</b>	<b>10</b>
<i>Technology marketing at events and trade fairs</i>	
<b>Material</b>	<b>12</b>
<i>Material</i>	
Unermüdlich – aktives Helikopter-Rotorblatt besteht dynamischen Full-Scale-Test	14
<i>Fatigue-resistant – active helicopter rotor blade passes dynamic full-scale test</i>	
Materialien für die Energiewende – Lebensdauenerhöhung von Rotorblättern durch Nanopartikel	16
<i>Materials for the energy transition – longer service life of rotor blades due to nanoparticles</i>	
Energie in Scheiben – strukturintegrierte Superkondensatoren für Satellitenstrukturen	18
<i>Energy is in it – structure-integrated supercapacitors for satellite structures</i>	
Ein Blick in die Klebschicht – hochauflösende Dehnungsmessung mittels digitaler Bildkorrelation	20
<i>A look into the bondline – high-resolution strain measurement by digital image correlation</i>	
Ausnutzung von Kompositstrukturen im thermalen Grenzbereich	22
<i>Utilisation of composite structures at their thermal borderline</i>	
<b>Methoden</b>	<b>24</b>
<i>Methods</i>	
Effizientes Berechnen von Schlagschäden an Gesamtstrukturen? Geht!	26
<i>Efficient calculation of impact damage on composite structures? Possible!</i>	
Unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten	28
<i>Uncertainty quantification in aircraft design of unconventional configurations</i>	
Digitaler Zwilling – ein dynamisches Abbild und nicht nur eine digitale Kopie	30
<i>Digital Twin – a dynamic representation rather than just a digital copy</i>	
Das Maß der Dinge: die Energiefreisetzungsrate für Multi-Material-Grenzflächen	32
<i>The measure of things: how to determine critical energy release rates for multi-material interfaces</i>	
<b>Konstruktion</b>	<b>34</b>
<i>Construction</i>	
Qualitätssicherung von Reparaturklebungen an Faserverbundbauteilen	36
<i>Quality assurance in adhesively bonded composite repairs</i>	
Integration von Kabine, Struktur und Systemen für den Rumpf der Zukunft	38
<i>Integration of cabin, airframe and systems for the fuselage of the future</i>	
Flugversuch am Boden – Validierung eines Laminarflügel-Demonstrators	40
<i>Flight testing on the ground – validation of a laminar flow wing demonstrator</i>	
Produktionsgerechte Konstruktion von Flügelschalen	42
<i>Production-optimised design for efficient wing cover manufacturing</i>	

<b>Fertigung</b>	<b>44</b>
<i>Production</i>	
Neue Anlagentechnologie zur Fertigung hybrider CFK-Stahl-Profile	46
<i>New plant technology for the production of hybrid profiles of CFRP and steel</i>	
Montage 4.0 – flexibel aufgenommen, präzise montiert	48
<i>Assembly 4.0 – flexibly picked up, precisely mounted</i>	
Effektive Fertigungszyklen für CFK-Strukturen durch hybride Formwerkzeugtemperierung	50
<i>Effective manufacturing cycles for CFRP structures through hybrid mould tempering</i>	
Virtuelle Assistenzsysteme zur Wartung von Luftfahrzeugkomponenten	52
<i>Virtual assistance systems for maintenance of aircraft components</i>	
AddCompS™ – 3D-Druck mit endlosen Kohlenstofffasern	54
<i>AddCompS™ – 3D printing with endless carbon fibres</i>	
<b>System</b>	<b>56</b>
<i>System</i>	
Leicht und dynamisch – adaptive Blattfedern für den Schienenverkehr von morgen	58
<i>Lightweight and dynamic – adaptive leaf springs for railway transport of tomorrow</i>	
Adaptiver Spoiler – Beulen gegen den Luftwiderstand an laminaren Flügeln	60
<i>Adaptive spoiler – bumps for drag reduction on laminar wings</i>	
Lärmreduzierte Smart Linings mit leichter und kostengünstiger Hardware	62
<i>Noise-reduced smart linings with light and cost-efficient hardware</i>	
Funktioniert bei jedem Wetter: Strukturüberwachung in der Luftfahrt	64
<i>Works in any weather: Structural Health Monitoring in aeronautics</i>	
<b>Industrialisierung</b>	<b>66</b>
<i>Industrialisation</i>	
Erinnerungen an die Zukunft – virtuelles Abbild realer Aushärtungsprozesse	68
<i>A blast from the future – virtual image of real curing processes</i>	
Smarte Blätter – clevere Fertigung	70
<i>Smart blades – smart production</i>	
Mensch vs. Maschine – Inline-Qualitätssicherung von Faserlegeprozessen	72
<i>Human vs. machine – inline quality assurance for fibre placement processes</i>	
(Ver-)Schlüsseltechnologie: Datensicherheit durch digitalen Zwilling	74
<i>A digital twin's key feature: unlocking hardware encryption</i>	
<b>Das Institut im Detail</b>	<b>89</b>
<i>The institute in detail</i>	
Abteilungen	78
<i>Departments</i>	
Geschäftsfelder	84
<i>Business areas</i>	
Veröffentlichungen 2017–2018	90
<i>Publications 2017–2018</i>	
Neues Lehrbuch „Adaptronik“	92
<i>New course book "Adaptronik"</i>	
Patente 2017–2018	93
<i>Patents 2017–2018</i>	



# Das Institut im Überblick



Das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat die Expertise für den Entwurf und die Realisierung anpassungsfähiger, effizienter Faserverbundstrukturen und Leichtbausysteme. Die Forschung dient der Gewichtsminimierung tragender Strukturen, der Verbesserung der Kosteneffizienz in Herstellung und Betrieb, der Maximierung der in die Struktur integrierten Funktionalität, der Komfortsteigerung und der Erhöhung der Umweltverträglichkeit.



Das Institut bildet die Brücke zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung. Mit seinen Fachkompetenzen in Multifunktionswerkstoffen, Strukturmechanik, Funktionsleichtbau, Faserverbundtechnologie, Adaptronik und Verbundprozess-technologie orientiert sich das Institut entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung anpassungsfähiger, effizient gefertigter, toleranter Leichtbaustrukturen.

Hochleistungsleichtbau:  
anpassungsfähig – effizient – tolerant

Großforschungsanlagen in Braunschweig  
von oben nach unten:  
*Research facilities at site Braunschweig  
top down:*

Laborautoklav  
*Research autoclave*

Prüflabor; Airbus-zertifiziert und  
nach DIN ISO EN/IEC 17025 akkreditiert  
*Testing lab; Airbus-certified and  
accredited according to DIN ISO EN/IEC 17025*

Zusammenwirken der wissenschaftlichen Abteilungen, der grundlegenden Strategiefelder und der Geschäftsfelder der Anwendungsforschung  
*Collaboration between the scientific departments, the basic strategy fields and the business areas of application research*

Mit seinen kreativen Wissenschaftlern an den Standorten Braunschweig und Stade ist das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Partner für Industrie, Hochschulen, DFG, Forschungseinrichtungen, Ministerien und Zulassungsbehörden. Zur Klärung von Fragen der Stabilität, Festigkeit und Thermalanalyse betreiben wir einzigartige Versuchs- und Fertigungseinrichtungen wie thermomechanische Prüfstände, eine Beulanlage für dynamische Bauteilbelastungen sowie einen Mikrowellenautoklaven. Neben grundlegenden Arbeiten in der Zukunftsforschung fokussiert sich das Institut auf sechs Schwerpunkte in der Anwendungsforschung. Sie dienen der Durchführung von großen praxisorientierten Projekten mit abteilungsübergreifendem und interdisziplinärem Charakter.

Aufseiten der universitären Grundlagenforschung ist das Institut durch strategische Partnerschaften und Kooperationen mit der Technischen Universität Braunschweig, der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, der Technischen Universität Clausthal und weiteren Universitäten verbunden. Aufseiten der anwendungsorientierten Forschung ist durch die Schaffung des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) und durch die Technologietransferzentren in Hamburg und Bremen auch die Nähe zum industriellen Kunden gewährleistet.



Die Forschung am ZLP-Standort Stade konzentriert sich auf die Herstellung von komplexen Bauteilen in hochproduktiven Faserablageverfahren, die Steuerung von thermischen Aushärtprozessen und die voll automatisierte Fertigung von Großserienbauteilen im RTM-Prozess

*The research carried out at the ZLP site at Stade focuses on the manufacture of complex components in high-production fibre placement processes, of thermally inert curing processes in autoclaves and fully automated manufacturing of high-volume components in the resin transfer moulding (RTM) process*



## The institute in a nutshell

*The DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems is an expert in the design and development of innovative lightweight systems. The research serves the improvement of safety, cost-efficiency, functionality, comfort, and environmental protection.*

*The institute bridges the gap between fundamental research and industrial application. The expertise of the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems in multifunctional materials, structural mechanics, composite design, composite technology, adaptronics, and composite process technology is orientated along the entire process chain of making adaptable, tolerant, efficiently manufactured lightweight structures.*



Großforschungsanlagen in Stade  
von oben nach unten:  
*Research facilities at site Stade  
top down:*

Forschungsautoklav BALU®  
*Research autoclave BALU®*

Vollautomatisierte RTM-Prozesskette Evo  
*Fully automated RTM process chain Evo*

Faserablage-Anlage (AFP und ATL) GroFi®  
*Fibre placement facility (AFP and ATL) GroFi®*

High-performance structures  
adaptable – efficient – tolerant

*Creative scientists working at the sites in Braunschweig and Stade make the institute the ideal partner for the industry, the DFG (German Research Foundation), research institutions, ministries, and civil aviation authorities. In order to deal with strength, stability, and thermo-mechanical problems we operate unique experimental facilities like thermomechanical test facilities, buckling facilities with the special feature of dynamic loading, and a new microwave autoclave. Besides basic research for the future, the institute focuses on six application areas. They serve for the realisation of large practice-oriented projects of a cross-departmental and cross-disciplinary nature.*

*Seeking to promote fundamental research within higher education, the institute maintains a strategic partnership and cooperation with TU Braunschweig, Otto von Guericke University Magdeburg, TU Clausthal and other academic institutions. Moreover, the institute has established the Center for Lightweight Production Technology (ZLP) and the Technology Transfer Centers in Hamburg and Bremen to maintain close ties with clients from industry within its application-based research.*





Einen willkommenen Kontrast zur Büroumgebung stellt die DLR Wissenswelt Leichtbau® durch ihre abwechslungsreiche Raumgestaltung dar. Ihre sechs unterschiedlichen Nutzungsbereiche umfassen eine Fläche von rund 250 Quadratmetern und beinhalten mobile Arbeitsmittel sowie zeitgemäße Wiedergabemedien. Es ist Platz für Workshops mit bis zu 20 Personen. Der Einsatz agiler Innovationsmethoden und Kreativitätstechniken trägt ebenso zur Ideengenerierung bei wie ein Maker Spot, der zum „Denken mit den Händen“ auffordert. Anhand einfacher Modelle lassen sich Funktionsprinzipien vergegenwärtigen, testen und gegenseitig kommunizieren.

*DLR Wissenswelt Leichtbau® represents a welcome contrast to conventional office space thanks to its diversified interior design. Six different usable areas comprise a space of about 250 square metres and contain mobile working appliances and contemporary recording/reproduction media. There is sufficient space for workshops with up to 20 participants. The use of agile innovation methods and creativity technologies contributes to the generation of ideas as does a Maker Spot prompting to “think with one’s hands”. By means of simple models, functional principles can be envisioned, tested and mutually communicated.*

# DLR Wissenswelt Leichtbau®

## Innovation lab "DLR Wissenswelt Leichtbau®"

Vor den Toren des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig befindet sich die DLR Wissenswelt Leichtbau® im neugebauten Lilienthalhaus, einem Besucher- und Dienstleistungszentrum für Luftfahrt, Raumfahrt und Mobilität. Mit der DLR Wissenswelt Leichtbau® wenden wir uns an Wirtschafts- und Industriepartner, um uns dort intensiv mit ihren Leichtbau-Herausforderungen und Fragestellungen auseinanderzusetzen. Den passenden Rahmen bildet eine Ausstellung aktueller Demonstratoren, die die Möglichkeiten des Hochleistungsleichtbaus aus Luft- und Raumfahrt „begreifbar“ werden lassen.



Das Lilienthalhaus befindet sich außerhalb des DLR-Geländes und direkt am Flughafen Braunschweig  
*The Lilienthalhaus is situated outside the DLR premises directly at Braunschweig Airport*

Doch nicht nur in Flugzeugen und Satelliten helfen Leichtbau und Faserverbundkunststoffe Energie und Gewicht zu sparen. Derartige Werkstoffe sind auch für eine Vielzahl anderer Anwendungen interessant. Ganz gleich, ob es sich um besonders dünne Kondensatoren als Teil einer tragenden Struktur oder formveränderliche Strukturen aus dem 3D-Drucker handelt.

Gewinnen Sie mit unseren Experten Einblick in die Welt des Leichtbaus und profitieren Sie von der Expertise und der Bandbreite unterschiedlicher Forschungsbereiche und extremer Einsatzgebiete. Unser umfangreiches Wissen über Leichtbaustrukturen ermöglicht es, Aussagen über Haltbarkeit, Alterung und Versagen treffen und diese Prozesse simulieren zu können. Die DLR Wissenswelt Leichtbau® versteht sich als Transfer-Plattform und dient fortan allen Unternehmen, besonders kleinen und mittelständischen Unternehmen, als Anlaufpunkt, um mit Wissenschaftlern in direkten Austausch zu treten. Die Räumlichkeiten laden dazu ein, mit Hilfe Ihrer Ideen und unserer Expertise neue Anwendungsfälle und Fertigungsabläufe für morgen zu denken.

Mit über 70 Veranstaltungen seit Jahresbeginn wird die DLR Wissenswelt Leichtbau® bereits vielfältig für Gespräche, Vorträge, Seminare, experimentelle Formate mit Kooperationspartnern, Industriekunden, transdisziplinären Teams und Start-ups genutzt. Sie bildet eine Schnittstelle zwischen Forschung und Industrie, die über den Einsatz einzelner Transferinstrumente hinausreicht. Die DLR Wissenswelt Leichtbau® verfolgt das Ziel, den Transfer von Forschung in die Anwendung zu stärken und zur Innovationsgenerierung beizutragen, indem der bidirektionale Austausch die Möglichkeit für Kooperationen und Vermarktungspotenziale steigert.



Alles auf Rollen – flexibles Mobiliar ermöglicht unkompliziertes Arbeiten an neuen Ideen und Konzepten in kleinen Teams  
*Everything on castors – flexible furnishings enable uncomplicated work on new ideas and concepts in small teams*

Koordinator:  
Dr. phil. Matthias Lossau



## Summary

*At the gates of the German Aerospace Center in Braunschweig, the DLR Wissenswelt Leichtbau® is located in the newly built Lilienthalhaus. With the DLR Wissenswelt Leichtbau® as a transfer platform, we turn to business and industry partners to deal intensively with your lightweight construction challenges and issues. The appropriate setting is an exhibition of current demonstrators that will make the possibilities of high-performance lightweight construction in aviation and space travel comprehensible. Not only in airplanes and satellites lightweight construction and fiber composite plastics help to save energy and weight. Gain insight into the world of lightweight construction with our experts and benefit from the expertise and range of different research areas and extreme fields of application. Our extensive knowledge of lightweight structures makes it possible to make and simulate durability, aging and failure.*



# Technologiemarketing auf Messen und Veranstaltungen

*Technology marketing at events and trade fairs*



## Wissenschaftstag – Additive Composite Structures

Die rasante Entwicklung des 3D-Drucks schafft immer anspruchsvollere Leichtbauteile, deren Einsatz in der Faserverbundfertigung neue Möglichkeiten eröffnet. Unter dem Begriff AddCompS™ (Additive Composite Structures) erforscht das Institut nun, wie sich 3D-Druckverfahren in bereits bestehende Produktionstechnologien integrieren lassen. Bisher nicht effizient herstellbare multimaterielle und mehrskalige Werkstoffe sowie Strukturen und Systeme mit integrierten Funktionen sollen somit in naher Zukunft leichter und kostengünstiger realisierbar sein.



Erstmalige Vorstellung des am Institut entwickelten AddCompS™-Druckkopf zum kohlenstoffverstärkten 3D-Druck von hochbelastbaren Bauteilen mit Endlosfasern

*First introduction of the AddCompS™ print head developed at the institute for carbon-reinforced 3D printing of heavy-duty components with continuous fibres*

Mit diesen Forschungsthemen beschäftigten sich 160 Wissenschaftler aus dem DLR, aus Universitäten und der Industrie, die am 19. Oktober 2017 in Braunschweig tagten. Der DLR Wissenschaftstag wird jährlich vom Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik veranstaltet. Die wissenschaftliche Fachkonferenz soll den Weg von der Grundlagenforschung in die industrielle Anwendung unterstützen.

## Leichtbautag B2B in Stade

Seit 2009 erforschen und entwickeln das DLR und die Fraunhofer-Gesellschaft in Stade gemeinsam mit mehr als 50 Unternehmen neue Produktionstechnologien für Luftfahrt-Großstrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Um die weltweit führenden Ergebnisse nun auch in eine breite – über den Flugzeugbau hinausreichende – industrielle Anwendung zu bringen, fand am 15. November 2017 im Forschungszentrum CFK NORD in Stade der erste branchenübergreifende Leichtbautag statt.

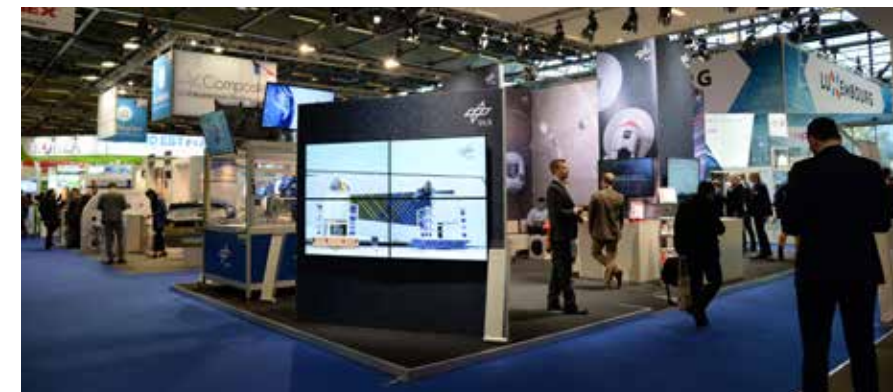
Auf Initiative des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr luden das DLR und die Fraunhofer-Gesellschaft an Forschungsprojekten mitwirkende Industriepartner und potenzielle neue Anwender innovativer Produktionstechnologien für CFK-Bauteile ans Forschungszentrum CFK NORD ein. Dort wurde den Gästen ein ungefilterter Einblick in die Anlagen-Technologien geboten, die zwar für den Flugzeugbau entwickelt wurden, sich aber relativ schnell für andere Einsatzfelder modifizieren lassen.



Ingelore Hering, Abteilungsleiterin Industrie und maritime Wirtschaft im Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, besucht den Stand der DLR-Ausgründung COPRO Technologie GmbH: Das am DLR entwickelte Verfahren dient zur Fertigung von gekrümmten Faserverbundprofilen (Bild: DLR, FhG-IFAM)  
*Ingelore Hering, head of the department Industry and Maritime Economy at the Ministry of Economics of Lower Saxony, visits the booth of the DLR spin-off COPRO Technologie GmbH: the process developed at DLR serves for manufacturing curved composite profiles (image: DLR, FhG-IFAM)*

## JEC World in Paris

Auf der JEC World in Paris, der europäischen Leitmesse für Faserverbundleichtbau, präsentierte das DLR vom 6. bis 8. März 2018 aktuelle Forschungsprojekte rund um das Thema faserverstärkte Hochleistungskunststoffe. Im Mittelpunkt des gemeinsamen Auftritts des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade, der DLR-Einrichtung Simulation und Softwaretechnik und des DLR-Instituts für Bauweisen und Strukturtechnologie standen in diesem Jahr innovative Technologien für die digitalisierte Produktion von Faserverbundbauteilen. Am rund 80 Quadratmeter großen DLR-Stand in Halle 5a (E66) zeigten und erklärten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vielfältige Beispiele für Anwendungen, vor allem aus den Bereichen der Luft- und Raumfahrt.



Der DLR-Stand auf der JEC World in Paris in Halle 5a  
*The DLR stand at JEC World in Paris in hall 5a*

## ILA Berlin Air Show

Auf der Internationalen Luft- und Raumfahrt-Ausstellung ILA Berlin Air Show vom 25. bis zum 29. April 2018 präsentierte sich das Institut mit vier Exponaten, der Eurofighter Airbrake, einem Structural-Health-Monitoring-Demonstrator, einer HLFC-Flügelvorderkante sowie dem SAGITTA-Demonstrator für unbemanntes Fliegen. Das DLR war auch 2018 wieder einer der größten institutionellen Aussteller auf rund 700 Quadratmetern in Halle 4, im Space Pavilion, am Stand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie in Halle 2 und im ILA CareerCenter in Halle 1. Auf dem Außengelände der ILA stellte das DLR einen Großteil seiner Forschungsflotte aus.

Am ILA-Stand konnte der Besucher die SHM-Technologie interaktiv erfahren  
*Visitors to the DLR stand at ILA could interactively experience the SHM technology*



## Summary

*Every year, the institute promotes its new technologies and developments at several events such as conferences and trade fairs. The aim is creating a technology transfer from research to application.*

*Main events in 2017 and 2018 were:*

- Wissenschaftstag – Additive Composite Structures
- Leichtbautag B2B in Stade
- JEC World in Paris
- ILA Berlin Air Show

*Information about upcoming events organised by DLR is available on event.DLR.de/en/*

Marketing und Kommunikation:  
Jana Hoidis, M.Sc.



EVENT.DLR.DE: DAS PORTAL FÜR VERANSTALTUNGEN DES DLR

Hier finden Sie Informationen zu Veranstaltungen, die vom DLR durchgeführt werden oder an denen das DLR teilnimmt, unter anderem Messen, Ausstellungen, Workshops oder Kongresse, in Deutschland und weltweit.

event.DLR.de





Thermallast durch Infrarotstrahlung in der Thermex-Anlage für thermo-  
mechanisch gekoppelte Strukturversuche (hier ohne Teststruktur)

*Thermal loading through infrared radiation at the Thermex facility for thermo-  
mechanically coupled structural testing (here shown without test structure)*

Material

Material

Unermüdlich – aktives Helikopter-Rotorblatt besteht dynamischen Full-Scale-Test\_\_\_\_\_ 14

*Fatigue-resistant – active helicopter rotor blade passes dynamic full-scale test*

Materialien für die Energiewende – Lebensdauererhöhung von Rotorblättern durch Nanopartikel\_\_ 16

*Materials for the energy transition – longer service life of rotor blades due to nanoparticles*

Energie in Scheiben – strukturintegrierte Superkondensatoren für Satellitenstrukturen \_\_\_\_ 18

*Energy is in it – structure-integrated supercapacitors for satellite structures*

Ein Blick in die Klebschicht – hochauflösende Dehnungsmessung mittels digitaler Bildkorrelation \_\_ 20

*A look into the bondline – high-resolution strain measurement by digital image correlation*

Ausnutzung von Kompositstrukturen im thermalen Grenzbereich \_\_\_\_\_ 22

*Utilisation of composite structures at their thermal borderline*



# Unermüdlich – aktives Helikopter-Rotorblatt besteht dynamischen Full-Scale-Test

*Fatigue-resistant – active helicopter rotor blade passes dynamic full-scale test*

**Einen effektiven Ansatz zur Verbesserung der Lärm- und Vibrationscharakteristik von Helikoptern stellt die aktive Verwindung der Rotorblätter mittels in die Blatthaut integrierter piezokeramischer Aktuatoren dar. Aufgrund des hohen experimentellen Aufwands wurden aktive Rotorblätter bisher meist im Modellmaßstab untersucht. Im dynamischen Großversuch konnten die aktive Performance und die Haltbarkeit eines vollmaßstäblichen Rotorblattsegments nun erstmals unter realitätsnahen Belastungen experimentell verifiziert werden. Ein wichtiger Meilenstein für die Umsetzung dieser Technologie wurde erreicht.**

## Summary

*Piezo-actuated active twist blades have the potential to significantly reduce noise and vibration generated by the main rotor of a helicopter. In contrast to prior investigations using downscaled rotor blades, a sophisticated fatigue test was set up providing combined tension, bending and twisting of a full-scale rotor blade segment. Dynamic tests are conducted at five load levels with load amplitudes between 10 per cent and 100 per cent of the representative flight loads. The active twist performance is characterized by means of strain and twist angle measurements. Data analysis revealed only a minor decrease of active twist performance caused by wear of the test setup and increasing bearing friction. Although 270,000 load cycles were accomplished, no damage of the actuators was identified.*

## Leise und vibrationsarm durch aktive Rotorblätter

Im Rahmen des Clean Sky 1 Green Rotorcraft-Projekts wurde ein vollmaßstäbliches, aktiv verwindbares Rotorblatt ausgelegt und in Form eines zwei Meter langen Blattsegments realisiert. Die jeweils auf der Blattober- und -unterseite in die Haut integrierten piezokeramischen Aktuatoren wirken als „künstliche Muskeln“ und ermöglichen eine Blattspitzenverwindung von über zwei Grad. Die mehrmals pro Rotorumdrehung erzeugte Verwindung beeinflusst die Aerodynamik des Helikopters und ermöglicht eine signifikante Verminderung von Lärm und Vibrationen. Die hohen aus der Rotorumdrehung resultierenden Fliehkräfte stellen einen kritischen Lastfall für die Aktuatorik dar.

## Ziehen, Biegen und Tordieren – gleichzeitig natürlich!

Im Fokus der Untersuchungen stehen die Charakterisierung der Verwindungsperformance sowie die Verifizierung der mechanischen Integrität der Aktuatorik unter realitätsnahen Schwingbeanspruchungen. Der zum Test des Blattsegments eingerichtete Großversuch ermöglicht die Einleitung komplexer mehrachsiger Belastungen aus Zug-, Biege- und Torsionslasten. Robuste Glasfaserlaminat an den Blattsegment-Enden stellen eine homogene Lastenleitung in Holm und Blatthaut sicher. Die experimentelle Abbildung der in

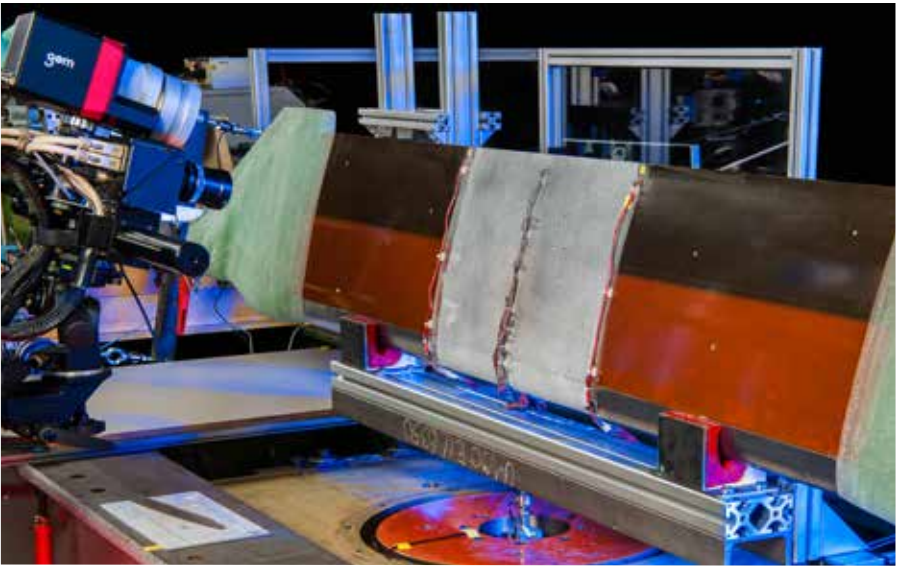
Blattlängsrichtung wirkenden Fliehkraft (circa 11 Tonnen) sowie der gekoppelten Schlag- (max. 850 Newtonmeter) und Schwenkmomente (max. 5.800 Newtonmeter), die über eine schiefe Vierpunktbiegung erzeugt werden, erfolgt servohydraulisch. Ein servoelektrischer Antrieb tordiert (max. 400 Newtonmeter) das Blatt mit Hilfe eines Seilsystems, das aus der Biegebelastung resultierende Blattverschiebungen kompensiert, ohne Zwangsmomente einzuleiten. Kraftsensoren erfassen die Biege-, Zug- und Torsionskräfte. Blattrotationen, Biegeverschiebung sowie Blattlängung werden mit Hilfe induktiver und laserbasierter Wegsensoren detektiert. Die digitale Bildkorrelation (ARAMIS) sowie auf die Blatthaut applizierte Dehnmessstreifen ermöglichen die Bestimmung globaler und lokaler Dehnungen.

In den dynamischen Versuchen wurden auf fünf Laststufen zwischen 10 und 100 Prozent der repräsentativen Fluglasten insgesamt 270.000 Lastzyklen durchlaufen, davon 100.000 bei Maximallast. Anders als im realen Betrieb erfolgt die aktive Verwindung aus Gründen der elektrischen Sicherheit in regelmäßigen Charakterisierungsversuchen am unbelasteten Blatt.

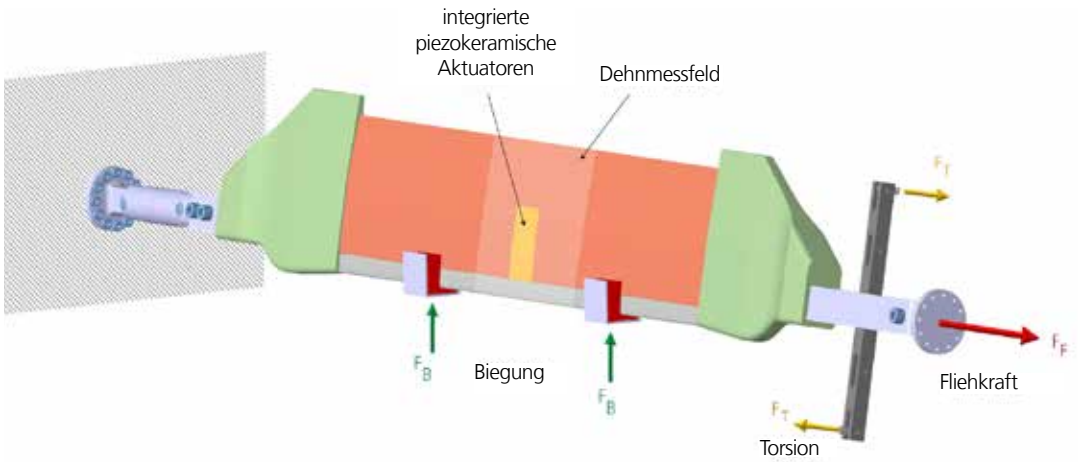
## Performance bleibt erhalten

Das fortschrittliche Blattdesign und die geschickte Integration des piezokeramischen Werkstoffs ermöglichen eine optimale Verwindungsperformance und hohe Festigkeiten gegenüber statischen und dynamischen Lasten. Rotorblattstruktur und Aktuatoren nehmen im Schwingfestigkeitsversuch keinen Schaden. Eine geringfügige Abnahme des Verwindungswinkels resultiert aus der Zunahme von Lagerreibung: der Versuchsaufbau ermüdet – das Rotorblatt hält!

Autor:  
Dr.-Ing. Till Julian Adam



Kombinierter Zug-Biege-Torsions-Schwingfestigkeitsversuch am vollmaßstäblichen aktiven Rotorblatt  
*Combined tension-bending-torsion fatigue test of the full-scale rotor blade segment*



Schematischer Versuchsaufbau: Erzeugung realistischer Lastkombinationen  
*Schematic test set-up: generation of realistic load combinations*



# Materialien für die Energiewende – Lebensdauererhöhung von Rotorblättern durch Nanopartikel

*Materials for the energy transition – longer service life of rotor blades due to nanoparticles*

Rotorblätter von Windenergieanlagen gehören zu den am höchsten ermüdungsbelasteten technischen Bauteilen. Um die Wirtschaftlichkeit und den Ertrag je Anlage zu steigern, ist deshalb der Einsatz neuer Materialsysteme mit verbesserten Schwingfestigkeiten notwendig. Dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik ist es gelungen, durch den Einsatz von nanoskaligen Matrixadditiven die Lebensdauer von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) um bis zu 270 Prozent zu steigern. Die eingesetzten Partikel wirken dabei als Rissstopper und vermindern die Entstehung sowie das Wachstum von Delaminationen. Gleichzeitig steigen die statischen Materialeigenschaften des Verbundes, während die Verarbeitbarkeit nahezu unbeeinflusst bleibt.

## Summary

*Wind turbine rotor blades made from glass fibre-reinforced plastics (GFRP) are among the most fatigue-stressed technical components. As the blade size has been steadily increased for economic reasons, state-of-the-art blade materials are reaching their performance limits. To provide optimised, highly fatigue-resistant structural materials, the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems conducts extensive research on nanoscale matrix modification. Recently, the institute succeeded in increasing the service life of GFRP by up to 270 per cent by means of surface-modified boehmite nanoparticles. The particles act as crack stoppers and thus reduce the formation and growth of delaminations. Moreover, the static material properties of the composite increase while its processability remains virtually unaffected.*

## Ermüdung von Rotorblättern

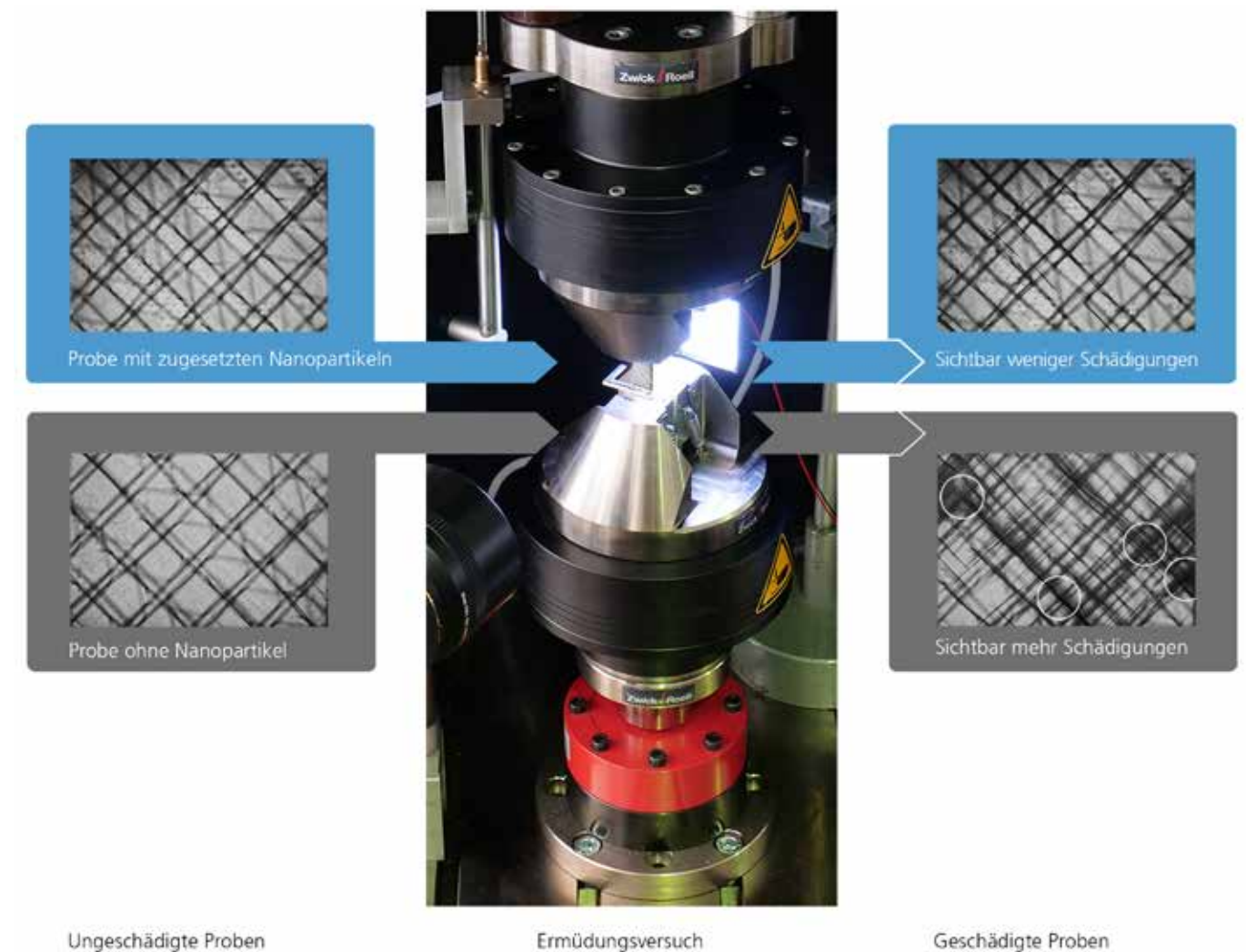
Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende wird entscheidend durch den Ausbau des Windenergiesektors getrieben. Um die Wirtschaftlichkeit der Anlagen zu steigern, ist eine Vergrößerung der Rotorblätter unumgänglich. Dies bedeutet jedoch eine überproportionale Steigerung der Massen, wodurch die statischen Beanspruchungen und vor allem die Ermüdungslasten der Blätter bei der Rotation wesentlich erhöht werden. Dabei müssen die eingesetzten Materialien diesen extremen Lasten für mindestens 20 Jahre standhalten. Die bisher im Rotorblattbau etablierten GFK-Werkstoffe stoßen mittlerweile an ihre Leistungsgrenzen, sodass der Bedarf für neue Werkstoffsysteme groß ist.

Zur Bereitstellung optimierter Materialsysteme wurden am DLR umfangreiche Forschungen durchgeführt, bei denen der Einfluss des Gehalts und der Modifikation von nanoskaligen Böhmitpartikeln in GFK untersucht wurde.

## Lebensdauererhöhung um Faktor 2,7

Für eine umfangreiche Charakterisierung der neuen Materialsysteme steht am Institut u. a. eine elektrodynamische Prüfmaschine zur Verfügung, mit der nicht nur die zyklischen Lasten aufgebracht werden, sondern parallel das Schädigungsverhalten des Materials analysiert werden kann. Dies geschieht durch eine simultane Aufnahme von Durchlichtbildern. Die Abbildung der inneren Schäden ermöglicht eine detaillierte Auswertung der Initiierung sowie des Wachstums von Rissen und Delaminationen.

Die durchgeführten Versuche zeigten dabei nicht nur große Verbesserungen in den statischen Kennwerten, sondern vor allem eindrucksvolle Steigerungen der Schwingfestigkeit. So konnte durch die Integration der Nanopartikel eine Verbesserung in Abhängigkeit vom Lastniveau um bis zu Faktor 2,7 erreicht werden. Die Auswertung der Schadensmechanismen zeigte ein deutlich späteres Einsetzen der Rissinitierung und Delamination. Neben dieser deutlichen Verbesserung der Lebensdauer konnte zudem durch eine gezielte Modifizierung der Partikel die Fließfähigkeit des dünnflüssigen Harzsystems erhalten bleiben, sodass die Infusion über die langen Fließwege bei der Rotorblattfertigung weiterhin möglich bleibt.



Elektrodynamische Prüfmaschine mit Möglichkeit der simultanen Aufnahme von Durchlichtbildern zur Untersuchung der Lebensdauer und des Schädigungsverhaltens glasfaserverstärkter Kunststoffe  
*Electrodynamic testing machine with integrated transmitted light setup providing service life and damage behaviour of glass fibre-reinforced plastics*

Autoren:  
Wibke Exner, M.Sc.  
Dr.-Ing. Till Julian Adam





# Energie in Scheiben – Strukturintegrierte Superkondensatoren für Satellitenstrukturen

Energy is in it – Structure-integrated supercapacitors for satellite structures

## Summary

In space applications, energy supply, volume and weight are of great importance. One approach to achieve a longer operating time with simultaneous increase in performance is the combination of energy storage and structure. In the Peak Power Platform project, the load-bearing integration of supercapacitors is demonstrated using the example of the stabilisation system High Torque Wheel in co-operation with three other DLR institutes. For this purpose, a film-like housing is being developed that can accommodate the entire supercapacitor structure consisting of collectors, electrodes, separator and electrolyte. On the one hand, this supercapacitor film is designed to provide similar specific performances as commercial supercapacitors of cylindrical design which are difficult to integrate efficiently. On the other hand, it is developed to bond to the composite in a load-bearing manner so that only only a 10 per cent lower stiffness occurs compared to pure fibre composites.

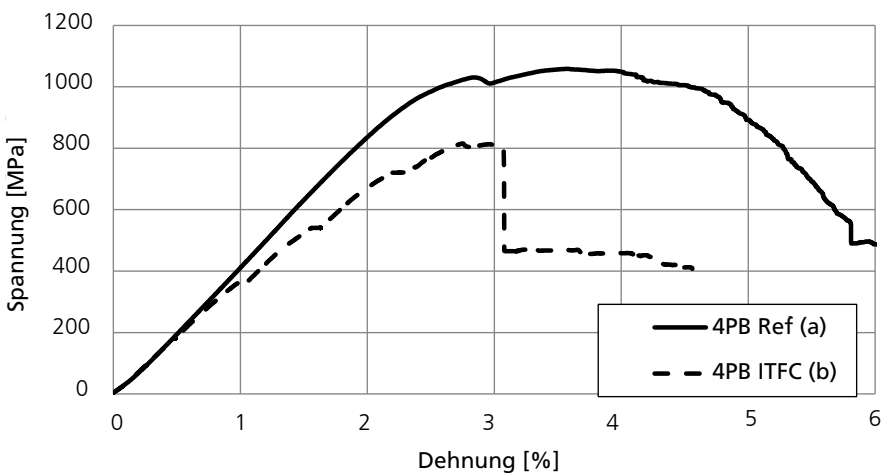
Spannungs-Dehnungs-Kurven bei einer 4-Punkt-Biegeprüfung, a) reines Glasfaserlaminat, b) Proben mit integriertem Superkondensator  
Stress-strain curve of a four-point bending specimen, a) plain glass-fibre laminate, b) specimen with integrated supercapacitor

**Die Energieversorgung ist die limitierende Größe für alle mobilen und autonomen elektrischen Systeme. Dies gilt insbesondere für Weltraumanwendungen, da hier eine Wartung nahezu ausgeschlossen ist. Darüber hinaus spielen Volumen und Gewicht von Weltraumstrukturen eine besondere Rolle. Durch die Integration eines physikalischen, lasttragenden Energiespeichers (Superkondensator) in die Struktur eines Satelliten kann die Lebensdauer der bordeigenen Akkumulatoren verlängert sowie gleichzeitig Volumen und Gewicht reduziert werden. Damit werden längere Missionszeiten möglich und es ist mehr Raum für Nutzlast vorhanden.**

## Warum ist ein Superkondensator super?

Das Funktionsprinzip von Superkondensatoren, auch Doppelschichtkondensatoren genannt, besteht in einer Anlagerung von geladenen Ionen an entgegengesetzt geladene Elektroden. Damit kann durch hauptsächlich physikalische Effekte innerhalb eines elektrischen Felds elektrische Energie gespeichert werden. Dieses Prinzip ermöglicht in kurzer Zeit hohe Ströme, da chemische Prozesse hier vernachlässigbar sind. Die Energiedichte von Superkondensatoren erreicht nur 1–10 Prozent der Batterie, aber mit  $10^6$  Ladezyklen besitzen sie eine sehr viel längere Lebensdauer. Weitere Vorteile bestehen in einem einfacheren Aufbau und geringerem Gewicht. Aus dem Lade-Entlade-Mechanismus resultieren vergleichsweise hohe spezifische Leistungen von 2–10 Watt/Gramm (0,3–1,5 Watt/Gramm bei Batterien).

In heutigen Satellitensystemen werden vornehmlich Akkumulatoren als elektrische Energiespeicher verwendet, deren Funktionsprinzip auf der Wanderung und elektrochemischen Wechselwirkungen von z. B. Li-Ionen mit unterschiedlichen Elektroden basiert. Die Energiespeicherung funktioniert hier rein chemisch. Dadurch sind hohe Energiedichten möglich, aber wegen der chemischen Reaktionen ergibt sich eine begrenzte Batterielebensdauer von circa  $10^3$  Zyklen. Darüber hinaus sind die Akkumulatoren von Satelliten durch kurzfristige Spitzenlasten sowie durch die ständigen Ladezyklen, die sich aus dem regelmäßigen Durchlaufen des Erdschattens ergeben, stark belastet und daher meist überdimensioniert.

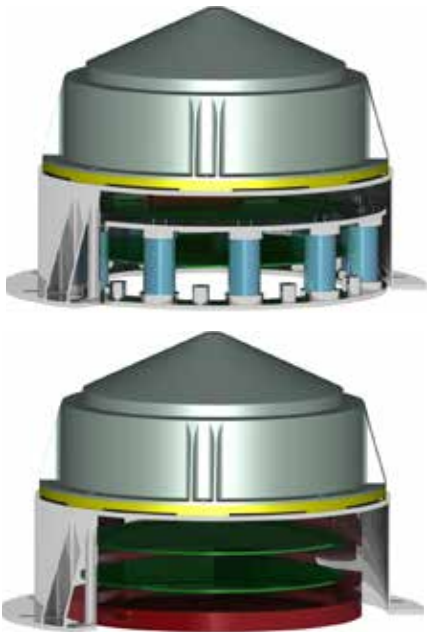


Im DLR-Projekt Peak Power Platform wird daher der neue Systemansatz für Satelliten verfolgt, Akkumulatoren mit Superkondensatoren zu kombinieren, um durch die Synergie dieser beiden Speichertechnologien Gewichts- und Volumenvorteile sowie eine längere Missionszeit zu erreichen. In Zusammenarbeit mit den Instituten für Optische Sensorsysteme, Technische Thermodynamik und Werkstoffforschung werden die Superkondensatoren in einem Schwungrad zur Lagestabilisierung (High Torque Wheel, HTW) strukturkonform integriert und für die Anwendung im Weltraum qualifiziert.

## Lasttragende Speicherfolien

Im Projekt werden zwei Konzepte verfolgt. Im ersten Konzept werden kommerziell verfügbare Superkondensatoren in die Struktur integriert. Für das zweite Konzept werden flache Folienkondensatoren entwickelt und in die Faserverbundbodenplatte des HTW integriert. Beide Konzepte werden für den Einsatz unter Weltraumbedingungen qualifiziert. Die lasttragenden Speicherfolien sind circa 150 Mikrometer dick, beinhalten kohlenstoffbasierte Elektroden und eine ionische Flüssigkeit. Die Foliengeometrie ist anpassbar und zeichnet sich durch eine hohe Biegeflexibilität aus: Die Festigkeit und das Elastizitätsmodul der Lamine werden durch die integrierten Folien unter Zugbelastung kaum und beim kritischen Biegefall um maximal 18 Prozent (Festigkeit) reduziert. Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit folienartigen, festkörperelektrolytbasierten, keramischen und polymeren Superkondensatoren, um die mechanischen Eigenschaften zu steigern, die Systemintegration dadurch zu vereinfachen und weitere parasitäre Masse (Gehäuse) zu reduzieren.

Hochflexible Superkondensatorfolie  
Highly flexible supercapacitor foil



High-Torque-Wheel mit integrierten Superkondensatoren; oben: kommerzielle Superkondensatoren, unten: Glasfaserplatte mit strukturintegrierten Superkondensatoren  
High Torque Wheel with integrated supercapacitors; top: commercial supercapacitors, bottom: glass-fibre panel with integrated supercapacitors

Autoren:  
Dipl.-Ing. Sebastian Geier  
Dipl.-Ing. Jan Petersen.





# Ein Blick in die Klebschicht – hochauflösende Dehnungsmessung mittels digitaler Bildkorrelation

*A look into the bondline – high-resolution strain measurement by digital image correlation*

## Summary

*A huge challenge is the availability of reliable material properties for adhesives. Strain gauges and extensometers provide average values but no information for the remaining area of the specimen. However, for anisotropic materials like composites or bonded joints, the average values may not be sufficient. Important strain gradients may not be detected. With digital image correlation (DIC) it is possible to gain detailed strain information over the complete measurement area. A newly developed test setup enables the visualisation of strain distribution of very small dimensions. Especially adhesive bondlines are of interest. A 42-megapixel pixel camera combined with a magnifying lens and a special specimen preparation unlocks measuring volumes of less than 5 x 7 millimetres. Hence, there is one pixel every 20 nanometres. This allows, for example, the measurement of the stress strain behaviour of very thin bondlines of 0.1 millimetres. These results are relevant for validating FEM simulations and help in optimising adhesively bonded joints.*

Zugversuch mit hochauflösender digitaler Bildkorrelation  
Tension test with high-resolution digital image correlation

**Mit Hilfe der hochauflösenden digitalen Bildkorrelation (engl. digital image correlation – DIC ) ist „ein Blick in die Klebschicht“ möglich und erlaubt es, die Phänomene bis zum Versagen erstmals detailliert zu verfolgen. Die Erkenntnisse sind besonders für die Validierung von numerischen Simulationen relevant.**

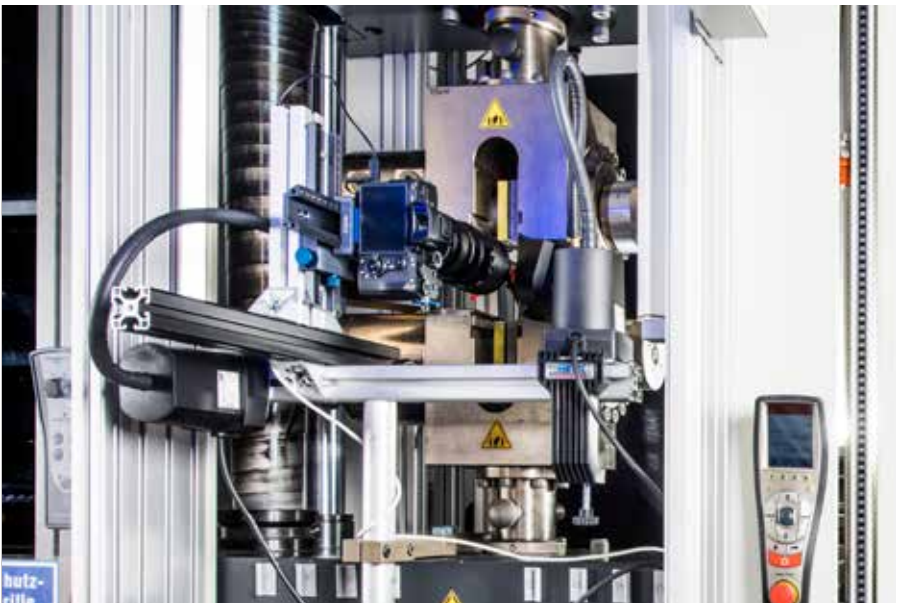
## Ein Blick in die Klebschicht

Die Herausforderung der digitalen Bildkorrelationsmethode bestand bisher in der Auflösung von sehr dünnen Klebschichten oder einzelnen Laminatlagen und deren ebenfalls sehr kleinen Dehnungen. Ein speziell entwickelter Messaufbau erschließt nun diese Bereiche und erlaubt es, flächige Dehnungsinformationen über die gesamte Klebschicht zu erhalten. Dies ermöglicht, neue Erkenntnisse zum mechanischen Verhalten von Materialien zu gewinnen.

## Der Versuchsstand

Ein wesentlicher Aspekt für eine zuverlässige Messung ist der optische Aufbau des Messsystems. Kommerzielle Systeme z. B. die unseres Forschungspartners GOM (Gesellschaft für optische Messtechnik) erreichen unter Verwendung von Industriekameras eine Auflösung von zwölf Megapixeln. Das Ziel ist meist die Messung großer Objekte mit Flächen bis zu mehreren Quadratmetern.

Diese Kamerasysteme sind jedoch nicht für den extremen Nahbereich optimiert und daher in ihrer Leistung hier begrenzt. Die Lösung ist die Kombination einer hochauflösenden Systemkamera mit 42 Mega Pixel Auflösung kombiniert mit einem speziellen Lupenobjektiv. Diese erlaubt die Abbildung eines Messfeldes von weniger als 5x7 Millimeter auf der kompletten Sensorfläche.



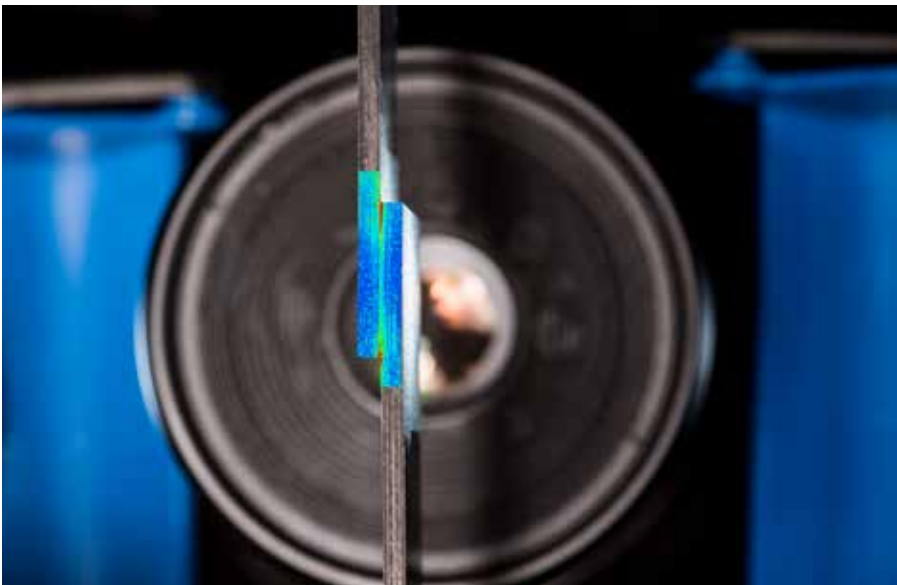
Erreicht wird somit eine Auflösung von unter 20 Nanometer pro Pixel. Dies ermöglicht erst eine extrem detaillierte Darstellung der Verformung auch kleiner Bereiche, wie z. B. innerhalb einer Klebschicht. Passend zum optischen Aufbau muss ein stochastisches Muster für die Facettenerzeugung auf die Probe aufgebracht werden, welches eine derart feine Messung erlaubt. Diese Herausforderung konnte mit einem Airbrush-System und einer Mischung aus Titandioxid und Eisenoxid bewältigt werden.

Für die Aufzeichnung der Messergebnisse wurde ein Interface entwickelt, welches die Kamera in Intervallen auslöst und synchron dazu Kraft- und Weginformationen der Prüfmaschine aufzeichnet. Die Berechnung der Bildkorrelation wird automatisiert in der GOM Correlate Software durchgeführt. Die anschließende Auswertung der Messdaten erfolgt automatisch bis zur Ausgabe typischer Materialwerte wie einer Schubspannungs-Gleitungskurve eines Klebstoffs. Das reduziert Kosten, ermöglicht weitaus größere Probenserien und liefert neue Erkenntnisse über das Materialverhalten.

## Vollflächige Dehnungsmessung

Insbesondere in geklebten Schäftverbindungen und Überlappungsklebungen von anisotropen Materialien wie Faserverbunden sind die Spannungen innerhalb der Klebschicht sehr inhomogen verteilt. Diese Gradienten und Spannungskonzentrationen können nicht von einzelnen Messpunkten wie Extensometern oder Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst werden. Die DIC-Messung liefert Dehnungsinformationen über den gesamten Messbereich.

SLS-Probe mit DIC-Messung  
Single Lab Shear (SLS) specimen with DIC measurement



Autor:  
Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Kosmann





# Ausnutzung von Kompositstrukturen im thermalen Grenzbereich

Utilisation of composite structures at their thermal borderline

## Summary

High temperatures lead to decreasing properties of polymer matrix systems. Therefore, simultaneous mechanical forces can lead to structural failure. The utilisation of validated nonlinear material models allows to derive advanced structural concepts and material systems adapted to particular applications and leads to potentials of increased service temperature and decreased weight compared to present designs. Finite element analyses investigate structural effects such as thermal hotspots and resulting material degradation on a generic level. Promising structural concepts are manufactured and experimentally investigated. Testing under stationary and transient conditions with simultaneous mechanical loads validates the simulative methods and improves the understanding of the thermomechanical structural behaviour under varying conditions.

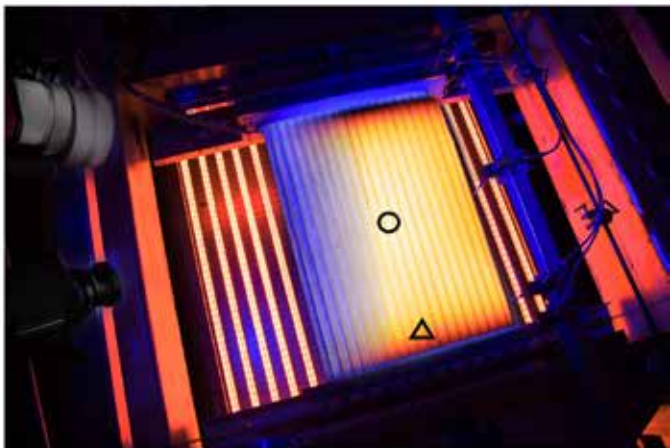
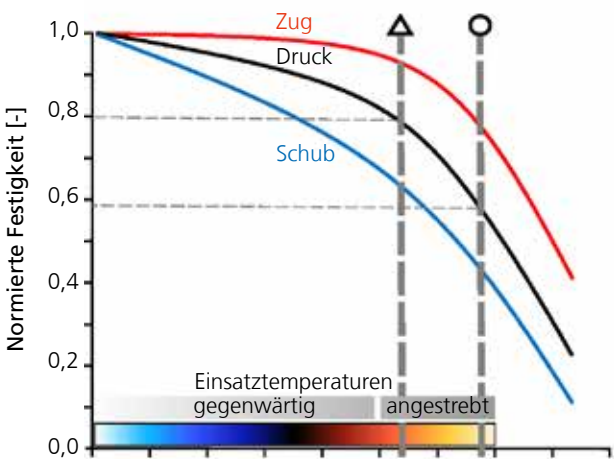
Die Forschungen am Institut zeigen, dass der Einsatz von Faserverbundstrukturen unter hohen thermomechanisch gekoppelten Lasten möglich ist und im Vergleich zu gegenwärtigen Anwendungen große Potenziale bietet. Anwendungsgerechte (nichtlineare) Materialmodelle verbessern die Vorhersagegenauigkeit. Dies bewirkt eine signifikante Gewichtsreduktion und erschließt weitere Einsatzgebiete im Flugzeugbau, Automobilbau und der Raumfahrt.

## Erhöhte Einsatztemperaturen

Klassische Duomerwerkstoffe erweichen bei Temperaturen ab 200 Grad Celsius. Wirken simultan mechanische Lasten, kann dies zum Strukturversagen führen. Zur Berücksichtigung von Temperatur und Feuchte werden in der gegenwärtigen Strukturauslegung sehr konservative Kriterien verwendet und maximale Einsatztemperaturen deutlich unterhalb der Glasübergangstemperatur definiert ( $\Delta T > 30$  Kelvin). Je nach Strukturkonzept und Belastungsart kann eine lokale, temperaturbedingte Reduktion von Materialeigenschaften auf dem Bauteillevel teilweise toleriert werden und ermöglicht die Ausnutzung existierender Potenziale. Experimentell validierte nichtlineare Materialmodelle ermöglichen höhere Einsatztemperaturen. Wie in der Abbildung dargestellt, beschreiben sie die Reduktion der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur. Zur Steigerung der tolerierbaren Thermallasten sind jeweils an die Anwendung angepasste Strukturkonzepte zu entwickeln. Dazu werden unterschiedliche Materialsysteme und Strukturtopologien berücksichtigt. Die Wärmetransporteigenschaften der Struktur bestimmen die Temperaturverteilung und somit die Ausprägung lokaler „Hotspots“, welche oft als Schwachstelle wirken. Derartige Hotspots können beispielsweise mit hoch wärmeleitfähigen Pechfasern sowie struktureller Verrippung verringert werden, da Wärme in kühlere Strukturbereiche und in die Umgebung abgeführt wird.

Temperaturverteilung im Strukturversuch (Thermex, rechts). Temperaturbedingt degradieren die Materialeigenschaften, beispielhaft durch Festigkeiten dargestellt (Diagramm, links).

Temperature distribution within structural testing (Thermex facility, right). Depending on the temperature material properties degrade, exemplarily represented by strength parameters (left).



## Simulation und Experiment

Der Weg zum validierten Strukturkonzept wird durch eine Kombination aus Simulation und Experiment erzielt. Mittels generischer Strukturversuche erfolgt die Validierung der Simulationen. Finite-Elemente-Analysen werden gezielt verwendet, um den Effekt verschiedener Variationen zu untersuchen und unterschiedliche Strukturkonzepte oder Laminataufbauten zu bewerten. Durch die Anwendung neuer nichtlinearer, temperaturabhängiger Materialmodelle werden Effekte wie z. B. die lokale, temperaturbedingte Reduktion der Materialeigenschaften berücksichtigt. Vielversprechende Strukturkonzepte werden gefertigt und getestet. Im Test werden verschiedene instationäre und stationäre thermische Zustände geprüft und damit das Thermalverhalten untersucht. Weiterhin werden die Thermallasten mit simultanen mechanischen Lasten überlagert. Messgrößen wie Temperatur, Dehnung und Verformung dienen der strukturellen Bewertung und der abschließenden Absicherung der Simulation.

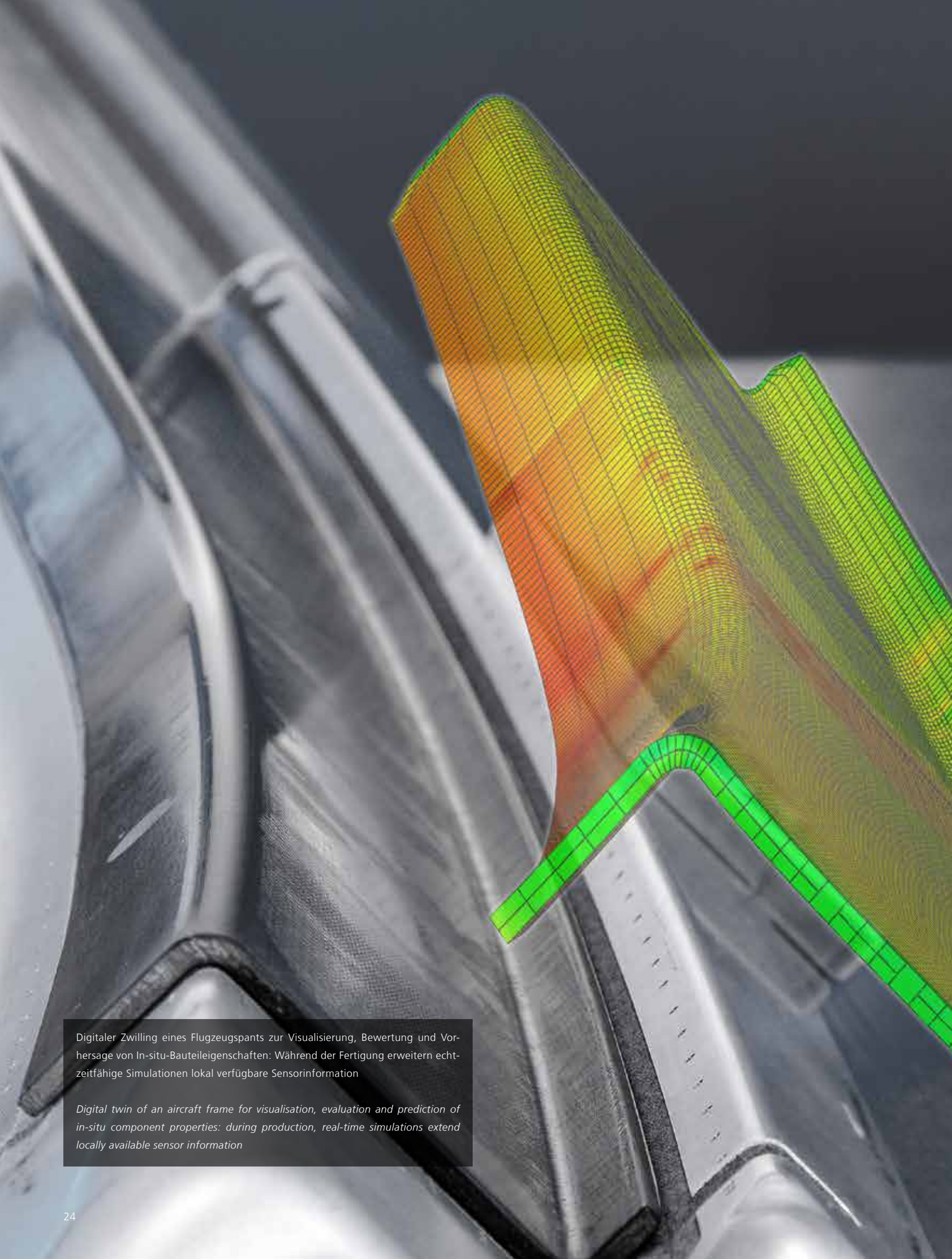
Autor:  
Dipl.-Ing. Martin Liebisch



Thermex-Versuchsanlage für thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche, hier ohne Versuchsstruktur: mechanische Lastenleitung in Grün, thermische Lasten durch Infrarotstrahlung in Rot gekennzeichnet

Thermex test facility for thermomechanically coupled structural tests, herein without test structure: mechanical load introduction marked in green, thermal heating by infrared radiation marked in red





Digitaler Zwilling eines Flugzeugspants zur Visualisierung, Bewertung und Vorhersage von In-situ-Bauteileigenschaften: Während der Fertigung erweitern echtzeitfähige Simulationen lokal verfügbare Sensorinformation

*Digital twin of an aircraft frame for visualisation, evaluation and prediction of in-situ component properties: during production, real-time simulations extend locally available sensor information*

## Methoden

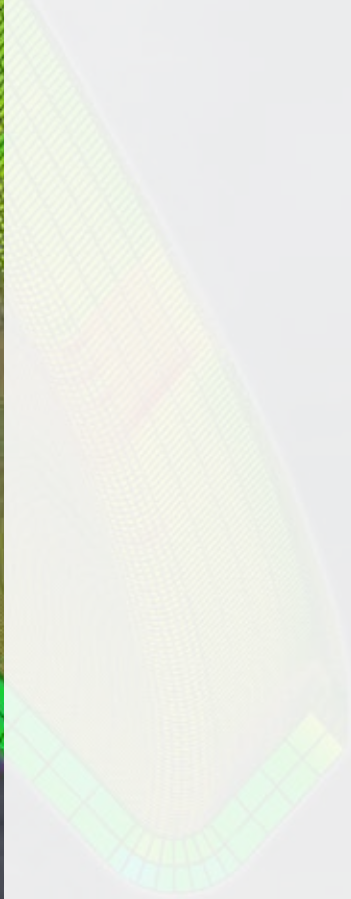
### *Methods*

Effizientes Berechnen von Schlagschäden an Gesamtstrukturen? Geht! \_\_\_\_\_26  
*Efficient calculation of impact damage on composite structures? Possible!*

Unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten \_\_\_\_\_28  
*Uncertainty quantification in aircraft design of unconventional configurations*

Digitaler Zwilling – ein dynamisches Abbild und nicht nur eine digitale Kopie \_\_\_\_\_30  
*Digital twin – a dynamic representation rather than just a digital copy*

Das Maß der Dinge: die Energiefreisetzungsrate für Multi-Material-Grenzflächen \_\_\_\_\_32  
*The measure of things: how to determine critical energy release rates for multi-material interfaces*





# Effizientes Berechnen von Schlagschäden an Gesamtstrukturen? Geht!

Efficient calculation of impact damage on composite structures? Possible!

Ein neuer analytischer Ansatz ermöglicht die Bewertung von Schlageinwirkungen (Impacts) auf Gesamtstrukturen. In Konstruktions- und Auslegungsprozessen von Faserverbunden lassen sich so frühzeitig Aussagen über die Entstehung und Auswirkung von Schlagschäden treffen. Anstelle eines pauschalen Sicherheitsfaktors erlaubt der Ansatz, nur dort zusätzliche Reserven vorzusehen, wo dies tatsächlich erforderlich ist. So können Hautdicken reduziert und ungenutztes Leichtbaupotenzial ausgeschöpft werden. Dank der analytischen Schadenserfassung in Kombination mit numerischen Modellen oder Experimenten bleibt der Bewertungsprozess effizient. Gegenüber konventionellen Simulationsmethoden reduziert sich die Berechnungszeit um bis zu 95 Prozent.

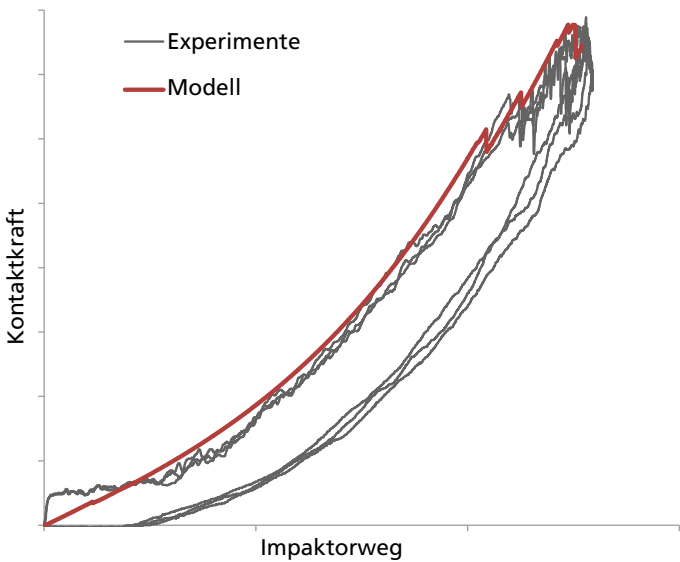
## Summary

A new analytical analysis method for impact damage on composite laminates permits evaluating an impact-prone structure as a whole. Such an analysis permits considering impact damage at an early state of a design process. In particular, the areal assessment of impact damage thus provided can form the basis of an improved damage tolerance assessment. Local thickness increase instead of general knock-down factors exploits lightweight potential that drastically reduces the structural weight. Therefore, an analytical model captures the specific impact damage behaviour of the laminate. A detailed finite element model can predict this behaviour on a reference coupon that is representative for a large area of the structure. The analytical approach scales the impact energy to allow a transfer of the impact damage from a coupon to any point of a structure with a similar laminate.

Übereinstimmung der Vorhersage des Modells mit Validierungsexperimenten  
Confirmation of the predicted result with validation experiments

## Analytische Schadenserfassung

Ein neu entwickeltes analytisches Ersatzmodell beschreibt das Schädigungsverhalten durch die schadensbedingte, zusätzliche Nachgiebigkeit des Laminates. Dieser integrale Schadensparameter ist eine laminatspezifische Zustandsgröße des dynamischen Impact-Systems. Mit Hilfe eines einmal ermittelten Schlagschadens sorgt das analytische Modell nun für Gültigkeit bei unterschiedlichen Einschlagsorten oder Randbedingungen. Hierzu wird die Impact-Energie entsprechend skaliert. Das Schädigungsverhalten selbst ist durch Experimente oder durch ein hochaufgelöstes Finite-Elemente-Modell ermittelbar. Wegen des ermöglichten Übertrags von Ergebnissen geschieht diese Ermittlung nicht an der Struktur, sondern anhand daraus abgeleiteter Referenzcoupons, die nur einen schadigungsrelevanten Strukturausschnitt darstellen. Qualitativ repräsentiert das Schädigungsverhalten eines Referenzcoupons alle vergleichbaren Orte der Struktur. Dies erfordert den gleichen Laminataufbau und ein ausreichend ähnliches Deformationsverhalten.



## Nutzung von Strukturreserven

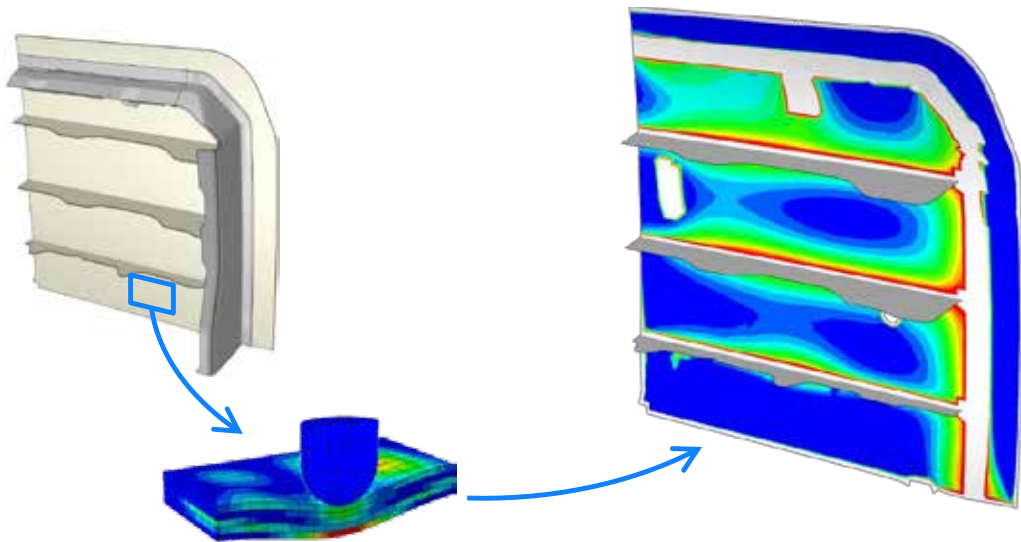
Einerseits reduziert diese Transfermethode den Aufwand für die Berechnung und die Modellierung erheblich. Andererseits erlaubt sie durch eine einzelne Couponanalyse Aussagen über den Schweregrad der Schlageinwirkung auf weite Flächenbereiche einer Struktur. Die schadenstolerante Auslegung einer Struktur kann so basierend auf dem tatsächlich möglichen Schaden an jedem potenziellen Einschlagsort stattfinden.

In Zusammenarbeit mit Airbus Helicopters Door Systems wurde eine solche Strukturanalyse anhand einer Flugzeugtürstruktur demonstriert. An einem realen Bauteil kann eine SHM-Methode, wie auf Seite 74 in diesem Innovationsbericht beschrieben, die Betriebssicherheit des Bauteils erhöhen. Zur abschließenden Schadensbewertung in der Auslegung kann der vorgestellte Ansatz mit einer leistungsfähigen Restfestigkeitsanalyse kombiniert werden (vgl. Dienel: *Individuelle Schadensbewertung – neuer Ansatz zur Reparatur*, Innovationsbericht 2017, Seite 36).

Autor:  
Dipl.-Ing. Raffael Marius Bogenfeld



Vorhersage von Schlagschäden an einem Referenzcoupon, dessen Ergebnis die Ermittlung der Impact-Schadensanfälligkeit an einer Gesamtstruktur ermöglicht.  
Prediction of impact damage using a reference coupon. The result allows the analysis of the impact threat on the structural level.





# Unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten

Uncertainty quantification in aircraft design of unconventional configurations

Beim Entwurf unkonventioneller Flugzeugkonfigurationen, wie der des Strut-Braced-Wing (SBW), ist es wichtig, die Aussagesicherheit des Entwurfsergebnisses zu kennen. Aufgrund der unkonventionellen Flugzeugkonfiguration entfernen wir uns aus dem Konfidenzbereich klassischer empirischer Methoden zur Massenanalyse. Daher haben wir im multidisziplinären Kontext ein System zur Identifikation, Propagation und Bewertung der Unsicherheiten für den Strukturentwurf entwickelt. Hiermit können wir die Auswirkung unsicherer Eingangsprozesse auf das Entwurfsergebnis analysieren. Das ermöglicht in Zukunft die quantitative Bewertung von Chancen und Risiken bei Einführung neuer Technologien zur Kostensenkung und Verringerung der Umweltbelastung.

## Summary

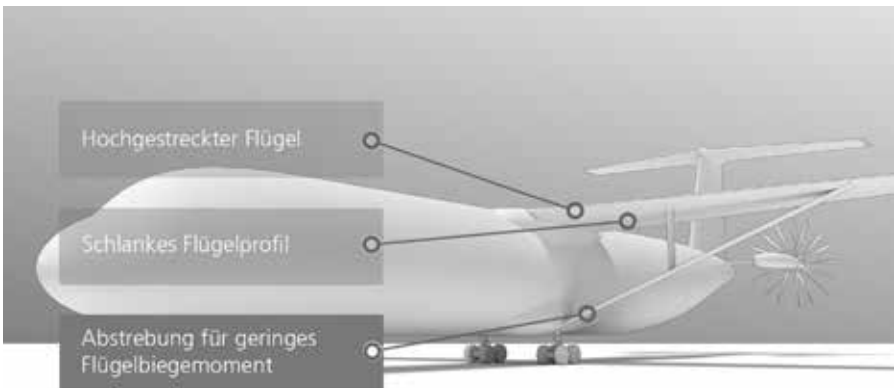
Uncertainty quantification is important when designing unconventional aircraft configurations such as the strut-braced wing aircraft. In a multidisciplinary team, we created a system to identify, propagate and assess the uncertainties involved in the aircraft design. We are now able to capture uncertainties, which are the result of the disruptive layout of this unconventional aircraft design. In terms of structures, we determined stochastic distributions for material properties as well as loads, since they have a high impact on the structural design. We estimated the effect of these uncertainties with respect to important output quantities such as primary masses of fuselage, wing and empennage. When contributing these uncertainties to the multidisciplinary design process, we can denote the most influential uncertain inputs and focus on their improvement. Additionally, this process enables robust design optimisations in order to trade off opportunities against risks for the design of unconventional aircraft.

## Unsere stochastische Welt

Obwohl unsere physikalische Welt stets Schwankungen unterliegt, werden im Allgemeinen Strukturbauteile mit deterministischen Methoden entworfen. Um die physikalische Variabilität bezüglich Materialkennwerten, Geometrie, Lasten etc. dennoch im Strukturentwurf zu berücksichtigen, werden traditionell pauschale Sicherheitsfaktoren angenommen. Als Konsequenz führen diese Faktoren zu einem Entwurfsergebnis, das zumeist hohe ungenutzte Tragreserven enthält.

Darüber hinaus beinhalten auch die Entwurfsmethoden Unsicherheiten mit unterschiedlich großen Varianzen, welche bei empirischen Methoden für unkonventionelle Konfigurationen höher sind. Im DLR-Projekt FrEACs (Future Enhanced Aircraft Configurations) haben wir unsichere Größen und ihre Auswirkungen im Verlauf eines Flugzeugentwurfs quantifiziert.

Visualisierung einer Flugzeugkonfiguration mit abgestrebtem Flügel und Hecktriebwerk  
Visualisation of an aircraft configuration with a strut-braced wing and rear-mounted engine

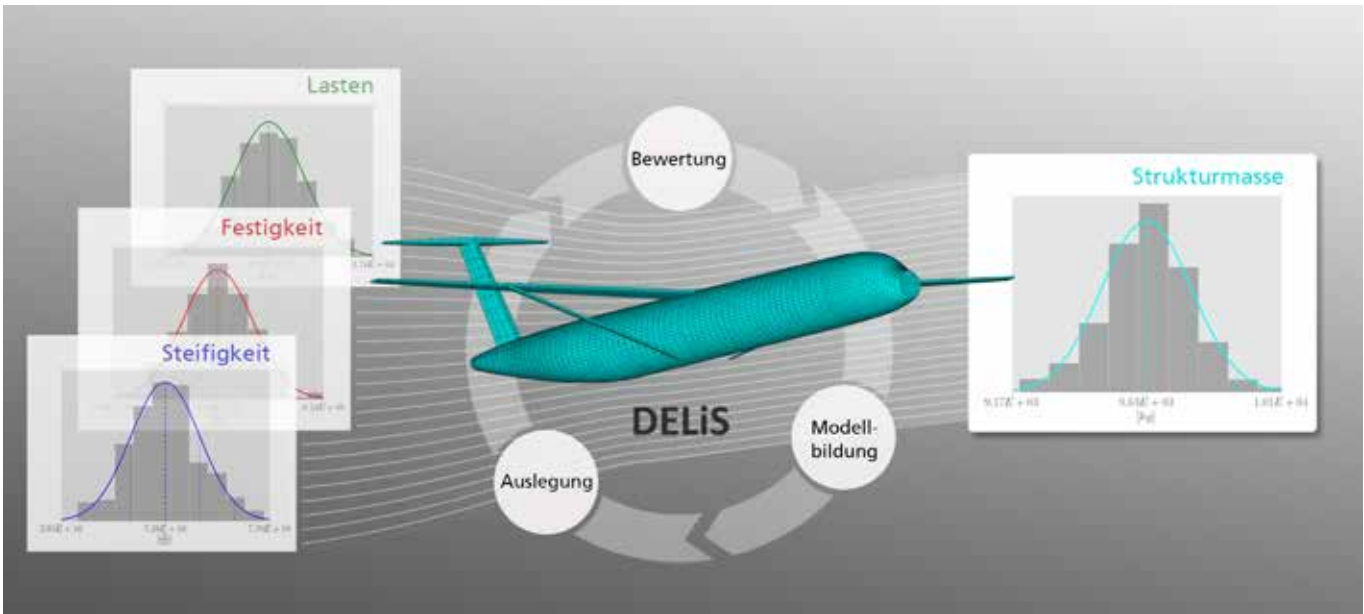


Mit dem gewonnenen qualitativen Verständnis und quantifizierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen sowie mit angepassten Werkzeugen sind wir in der Lage, Unsicherheitsanalysen im Entwurfsprozess durchzuführen. Sowohl Materialsteifigkeiten und -festigkeiten als auch Lasten haben einen großen Einfluss auf den Strukturentwurf. Daher haben wir deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt und gezeigt, wie sich die Unsicherheiten auf die Flugzeugprimärstrukturmasse auswirken. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liefern die Basis für eine robuste Designoptimierung.

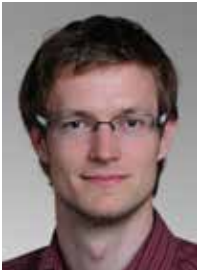
## Multidisziplinär entwerfen

In das multidisziplinäre Entwurfssystem des DLR integrieren und propagieren wir die ermittelten Massenverteilungen aus dem Strukturentwurf. Damit werden wichtige Zielgrößen des Flugzeugentwurfs, wie der Treibstoffverbrauch auf der Entwurfsmission oder das maximale Abfluggewicht, stochastisch mit Hilfe der anderen Disziplinen abgebildet. Mit den Fähigkeiten aus diesen Methoden können zukünftig über alle Disziplinen hinweg unsichere Parameter identifiziert, die Robustheit eines Designs im frühen Entwurfsstadium bewertet und bei Bedarf höherwertige Methoden zur Verringerung der Unsicherheit integriert werden. Dies steigert die Bewertungsfähigkeit für unkonventionelle Flugzeugkonzepte.

Prozess zur Unsicherheitsanalyse, bestehend aus der Identifikation von Eingangsunsicherheiten, deren Propagation durch eine Strukturauslegung und der Bewertung der Ausgangsunsicherheiten  
Process for uncertainty quantification which comprises the identification of uncertain input quantities, the propagation in the structural aircraft design and the assessment of output uncertainties



Autor:  
Dipl.-Ing. Sebastian Freund





# Digitaler Zwilling – ein dynamisches Abbild und nicht nur eine digitale Kopie

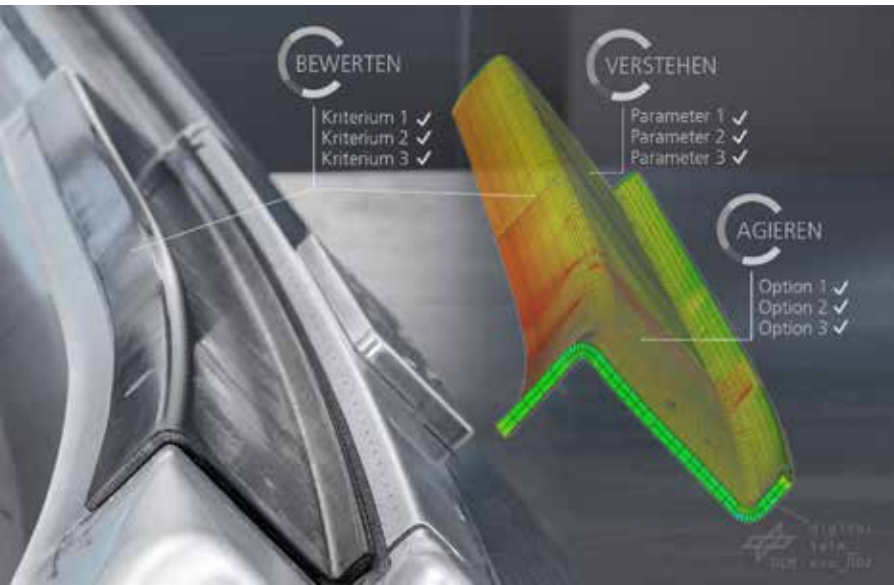
Digital twin – a dynamic representation rather than just a digital copy

Das digitale Abbild (engl. digital twin) eines realen Bauteils unterstützt Bewertungsprozesse und eröffnet erhebliche Verbesserungspotenziale im Prozess der Bauteilherstellung. Sensoren erfassen fertigungsbedingte Abweichungen. Basierend darauf berechnen schnelle Simulationsmodelle die realen Bauteileigenschaften. Der digitale Zwilling visualisiert und bewertet diese zusätzlichen Informationen. Dadurch sparen wir Zeit und Kosten, da eine nachgelagerte Strukturbewertung entfällt. Im Kontext von Industrie 4.0 arbeitet das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) an der (R)Evolution in der Verbundwerkstoff-Bauteilfertigung. Wir entwickeln Methoden und Konzepte, die den digitalen Zwilling befähigen, zu verstehen, zu bewerten und zu agieren.

## Summary

The digital twin supports evaluation processes and significantly improves the manufacturing process of composite parts. In case of occurring manufacturing-induced deviations (e.g. material deposition or curing), the actual part performance may differ from its intended behaviour. This entails time-consuming part re-evaluation, rework or rejection. Concurrent to the actual manufacturing, the digital twin is used for calculations of part properties based on sensor data. Consequently, we enhance available sensor data by simulation data to field information. In terms of real-time applicability, efficient surrogate models combine the capabilities of detailed simulation models and the speed of analytical approaches. By employing the digital twin, we visualise meta information such as residual stresses or other mechanical characteristics (augmented reality) and react on process deviations, if necessary.

Digitaler Zwilling eines Flugzeugspants: Ist-Bauteileigenschaften werden im Herstellungsprozess gemessen, berechnet, visualisiert und bewertet  
Digital twin of an aircraft frame: in-situ component properties are measured, calculated, visualised and assessed during part production



## Verstehen

Spalten (engl. gaps) und Überlappungen (engl. overlaps) bei der Faserablage oder Eigenspannungen und Verzug infolge des Aushärtens beeinflussen das strukturelle Verhalten von faserverstärkten Kunststoffen. Bereits während der Fertigung werden die zu erwartenden Bauteileigenschaften (bspw. Steifigkeiten, Festigkeiten, Aushärtgrade, Eigenspannungen) berechnet und als digitaler Zwilling bereitgestellt. Dadurch erweitern wir die bisher nur lokal verfügbaren Daten zur Prozess- und Bauteilbewertung zu 4D-Feldinformationen (3D, Zeit). Für die fertigungsbegleitende Strukturbewertung muss dieser simulationsbasierte Prozess echtzeitfähig sein.

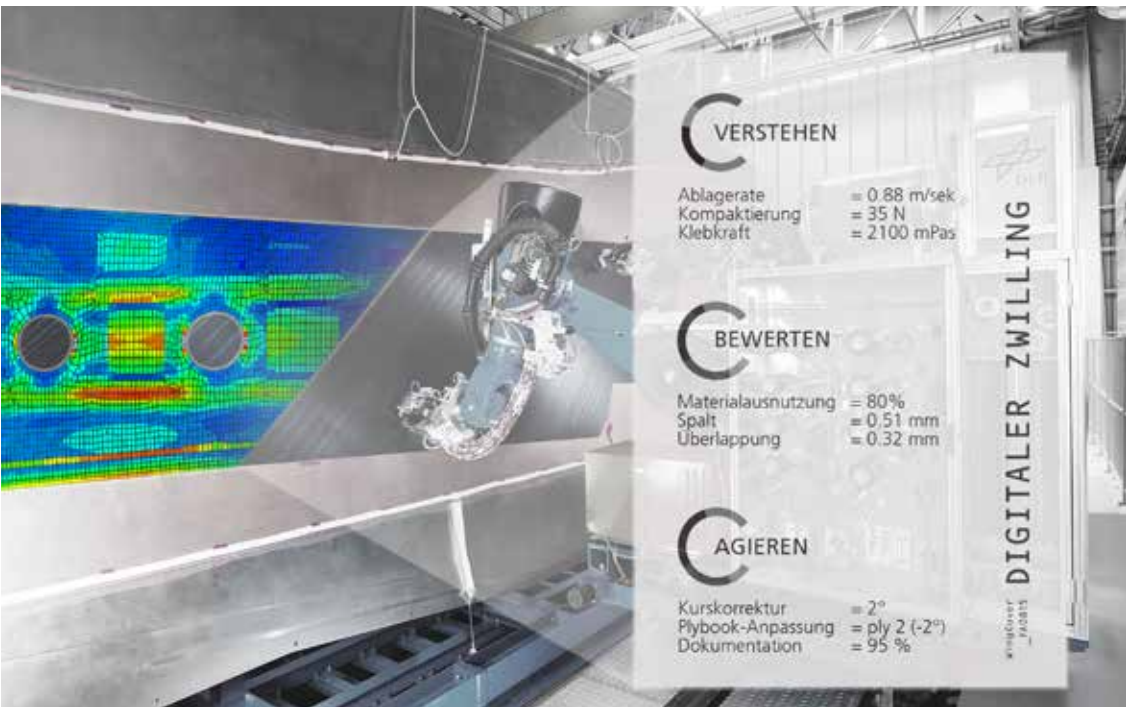
## Bewerten

Die Echtzeitanforderung an den digitalen Zwilling erfüllen wir mit effizienten Ersatzmodellen. Sie vereinen die Fähigkeiten detaillierter Simulationsmodelle und die Schnelligkeit analytischer Ansätze. Das Training der Ersatzmodelle (Feature Learning) basiert auf den detaillierten Simulationsmodellen. Es erfolgt anhand eines strukturierten Versuchsplans (engl. DoE – Design of Experiments). Im Herstellungsprozess erfassen wir durch lokale Messungen den Ist-Zustand und berechnen die Eigenschaften für das gesamte Bauteil in Echtzeit. Bisher basiert die Bauteilbewertung auf lokalen Messdaten. Hierzu liefern Ersatzmodelle flächige Informationen, die ein neuartiges erweitertes Qualitätsmanagement ermöglichen.

## Agieren

Das neuartige Qualitätsmanagement macht Prozesskorrekturen möglich und nachgelagerte Bewertungsprozesse unnötig. Über den digitalen Zwilling visualisieren wir nicht messbare Informationen wie Eigenspannungen oder mechanische Kennwerte (Augmented Reality). Bei Bedarf reagieren wir auf Prozessabweichungen. Zur durchgängigen Nachverfolgung können die Informationen, beispielsweise auf integrierten Chips, dokumentiert werden. (vgl. Haschburger, Uçan: *Erinnerungen an die Zukunft*, Innovationsbericht 2018, S. 68; vgl. Meister, Krombholz: *Mensch vs. Maschine – Inline-Qualitätssicherung am Beispiel eines automatisierten Faserlegeprozesses*, Innovationsbericht 2018, S. 72; vgl. Thorstrick-v. d. Lieth: *(Ver-)Schlüsseltechnologie – Datensicherheit durch digitalen Zwilling*, Innovationsbericht 2018, S. 74)

Autoren:  
Dipl.-Ing. Robert Hein  
Dipl.-Ing. Falk Heinecke



Faserablage einer Flugzeugstruktur: Spalten und Überlappungen werden erfasst, mit Soll-Daten verglichen und anhand der späteren Betriebslasten bewertet  
Fibre placement process of an aircraft structure: gaps and overlaps are detected, correlated with specifications and evaluated with operating loads



# Das Maß der Dinge: die Energiefreisetzungsrate für Multi-Material-Grenzflächen

*The measure of things: how to determine critical energy release rates for multi-material interfaces*

## Summary

Critical energy release (cERR) rates are necessary input values to describe separation between metal and fibre-reinforced plastics (FRP) in fibre-metal laminates. An experimental characterisation is conducted using peel, shear and combined load configurations. Hereby, shear loads lead to higher cERR. Special attention has to be paid to the inner thermal loadings. These result from the manufacturing at high temperatures in an autoclave. To determine the thermal portion of the cERR a thermal set-up is employed. The setup is considered to determine the temperature at which the inner stresses would vanish. Furthermore, the thermal portion of the cERR is determined using this stress-free temperature and an analytical solution. It was revealed that the thermal portion can be about 20 per cent of the cERR. The developed approach can be used to determine the "true" mechanical value of the cERR. The approach enables the simulation of fibre-metal laminates under arbitrary temperature conditions.

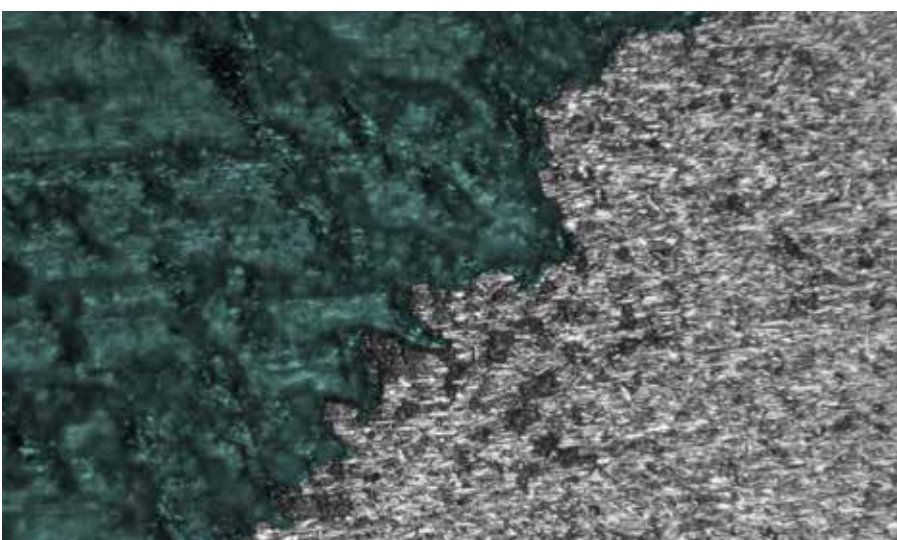
Mikroskopie der Bruchoberfläche  
eines hybriden Probekörpers  
*Microscopy of a fracture surface of  
a hybrid specimen*

Eine neu entwickelte Methodik ermöglicht die Berechnung des Delaminationswiderstands von Faser-Metal-Laminaten bei beliebigen Temperaturen. Ein Maß für den Widerstand gegen Schäden in den Grenzflächen eines Laminats ist die kritische Energiefreisetzungsrate (kEFR). Je höher diese ausfällt und je höher ihr Schubanteil, desto höher ist der Widerstand. Der Einsatz von Faser-Metall-Laminaten in modernen Leichtbaustrukturen führt zu Grenzflächen mit sehr besonderen Eigenschaften. Insbesondere thermale Vorbelastungen haben einen Einfluss auf das Schadenswachstum. Die neue Methodik ermöglicht es, diesen Anteil zu bestimmen und somit die „wahren“ kEFR zu erhalten. Der Unterschied beträgt bis zu 20 Prozent bei Raumtemperatur.

## Die Maßeinheit

Faser-Metall-Lamine kombinieren die positiven Eigenschaften von Faserkunststoffverbunden (FKV) und Metallen, was bspw. eine Realisierung von Strukturen mit hoher Verbindungsgüte bei gleichzeitig geringem Gewicht ermöglicht. Neben den Vorteilen bestehen jedoch einige Herausforderungen, die für einen erfolgreichen Einsatz zu bewältigen sind. Eine dieser Herausforderungen ist das Auftreten von Delaminationen in den Grenzschichten zwischen Metall und FKV. Ihre Auswirkungen auf die Tragfähigkeit werden mit der Finite-Elemente-Simulation ermittelt. Es sind entsprechende Bruchwiderstände als Eingangswerte notwendig. Bei Faserverbunden dienen hierzu kEFR. Zu ihrer Bestimmung werden quasi-statische Experimente durchgeführt. Untersucht wird der Einfluss von Schäl- und Schubbelastungen, als auch deren Kombination.

Untersuchungsgegenstand sind Proben mit einem künstlichen Anriss in der zu charakterisierenden Grenzfläche. Die aufgebrachte Belastung wird gesteigert, bis der Riss anwächst. Aus der Fläche des Risswachstums und der zugefügten Energie wird die kEFR für die jeweilige Belastungssituation ermittelt. Hierbei gilt: Je höher der Schubanteil, desto höher die kEFR.

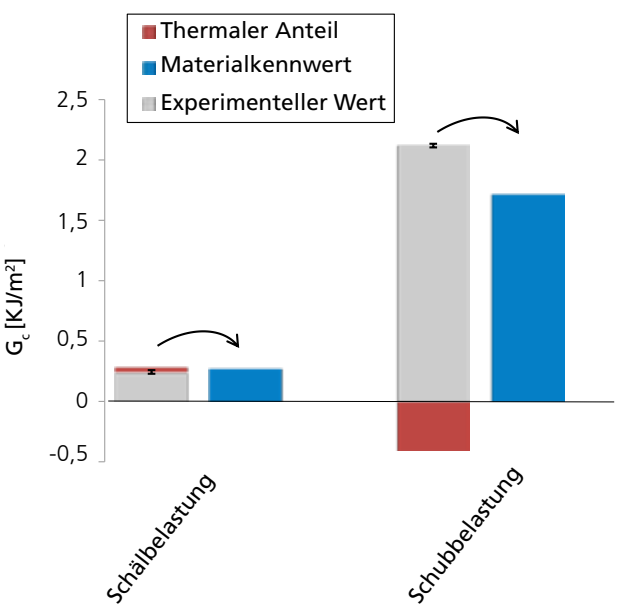


## Multi-Material-Grenzflächen

Neben der äußeren, mechanischen Belastung weisen Grenzflächen zwischen zwei Materialien eine weitere, innere Belastung auf. Die Wärmeausdehnung ist bei Metallen in der Regel um ein Vielfaches höher als bei FKV. Bei der Fertigung in einem Autoklaven entstehen durch die hohen Temperaturen Eigenspannungen. Um diese abzuschätzen, werden asymmetrische Probekörper verwendet, bei denen sich der thermale Anteil in einer globalen Verformung äußert. Eine Wiedererwärmung der Proben zeigt, bei welcher Temperatur die inneren Anteile minimal sind. Diese Information wird benötigt, um über einen analytischen Ansatz die thermalen Anteile an den kEFR zu bestimmen. Je nach Belastungsart wird der thermale Anteil zum experimentellen Wert hinzuaddiert oder subtrahiert. Die entwickelte Methodik ermöglicht es somit, das Delaminationsverhalten von Faser-Metall-Laminaten bei beliebigen Temperaturen zu simulieren.



Thermaxperiment zur Bestimmung der spannungs-  
freien Temperatur: oben T = 23 °C, unten T = 125 °C  
*Thermal set-up to determine the stress free temperature: T = 23 °C, bottom T = 125 °C*



Kritische Energiefreisetzungsrate für Schäl- und  
Schubbelastung unter Angabe des thermalen Anteils  
*Critical energy release rate under peel and shear  
loading considering the thermal portion*

Autor:  
Dipl.-Ing. Enno Petersen







Innovative Verbindung von Multimaterialstrukturen: Durch den Einsatz von Exzentern gelingt die Einhaltung hoher Anforderungen an die Oberflächengüte beim Austausch einer Flügelvorderkante für den Laminarflügel bei gleichzeitiger Vermeidung jeglicher Anpassungsarbeiten am Bauteil

*Innovative joint for multi-material structures: the use of eccentric bushes enables the complete interchangeability of a wing leading edge for the demanding laminar flow environment*

# Konstruktion

## Construction

Qualitätssicherung von Reparaturklebungen an Faserverbundbauteilen	36
<i>Quality assurance in adhesively bonded composite repairs</i>	
Integration von Kabine, Struktur und Systemen für den Rumpf der Zukunft	38
<i>Integration of cabin, airframe and systems for the fuselage of the future</i>	
Flugversuch am Boden – Validierung eines Laminarflügel-Demonstrators	40
<i>Flight testing on the ground –validation of a laminar flow wing demonstrator</i>	
Produktionsgerechte Konstruktion von Flügelschalen	42
<i>Production-optimised design for efficient wing cover manufacturing</i>	



# Qualitätssicherung von Reparaturklebungen an Faserverbundbauteilen

Quality assurance in adhesively bonded composite repairs

**Strukturelles Kleben ermöglicht besonders lastgerechte Fügeverbindungen und die Herstellung innovativer und mechanisch hocheffizienter Baugruppen. Eine Herausforderung dieser Technologie ist jedoch der zerstörungsfreie Nachweis der Festigkeit der Klebstoffanbindung (Adhäsion) an die Fügepartner. Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik wird ein neuartiges 2-in-1-Verfahren entwickelt, mit welchem erstmals ein umfänglicher und zerstörungsfreier Nachweis der Qualität geklebter Verbindungen geführt werden kann. Damit ist es potenziell möglich, die Klebtechnologie auch für sicherheitsrelevante Fügeverbindungen in der Luftfahrt einzusetzen.**

## Summary

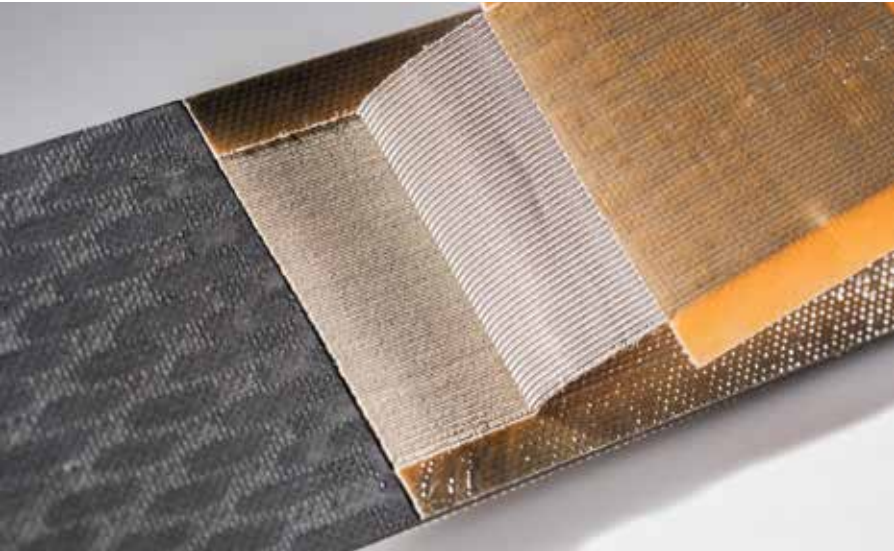
The certification of adhesively bonded structural repairs on civil aircraft requires the proof of limit load capacity for each single bonded joint. This is due to the fact that a failure of such a bond could lead to a catastrophic loss of the airplane. However, a reliable and cost-efficient method for the verification of the bond-strength is not available. To resolve this issue, a novel test method is being developed that can mechanically verify the strength of adhesive bonds. In this procedure, an open-meshed fabric is bonded onto the pre-treated surface area by means of the repair adhesive. After curing, the fabric is peeled off to test the strength of the bond. Any faults present in the bondline are detected as a change in the failure mode or peeling force, regardless of their cause. After successful testing, the repair patch is bonded onto the clean and chemically activated surface of the adhesive remaining on the part. This second bonding step is verified by adjacently installed test specimens. With the aid of this new method, full verification of the strength of adhesive bonds is possible, which can potentially enable the application of boltless bonded repairs in civil aviation.

## Verbindungsfehler sicher erkennen

Ohne einen individuellen Nachweis der Verbindungsfestigkeit sind sicherheitsrelevante Klebungen im Flugzeugbau nicht zulässig. Der Grund hierfür ist das mögliche Auftreten von Herstellungsfehlern, welche mit zerstörungsfreien Inspektionstechniken bisher nicht erkannt werden können. Insbesondere Reparaturklebungen an Flugzeugstrukturen aus Faserverbundwerkstoffen sind jedoch anfällig für solche Fehler, denn im Betrieb kommen diese Komponenten mit zahlreichen adhäsionshemmenden Medien in Kontakt und der manuelle Reparatur- und Klebeprozess muss oftmals unter schwierigen Bedingungen stattfinden.

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts FACTOR (Future Advanced Composite Bonding and Bonded Repair) entwickelt das DLR eine Nachweismethode, um solche Klebverbindungen zertifizieren zu können. Das neuartige Verfahren sieht vor, die Verbindungsfestigkeit jeder einzelnen Klebung mechanisch zu prüfen.

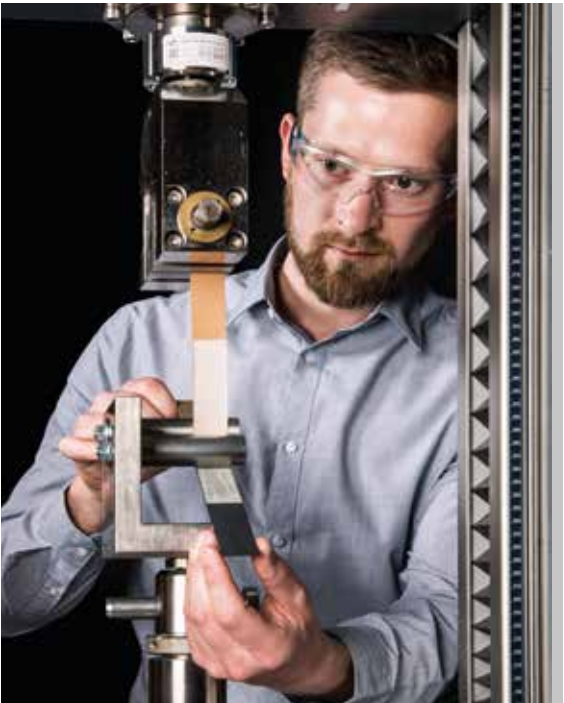
Detailansicht der Schälprobe an einem CFK-Substrat  
Detailed view of the peel test on a CFRP substrate



Dazu ist die Bauteiloberfläche vor der eigentlichen Verklebung zunächst mit einer Klebstoffbeschichtung zu versehen, in die ein dünnes Filtergewebe eingebettet ist. Anders als herkömmliche Abreißgewebe weist das Filtergewebe eine poröse Struktur auf, die durch Formschluss die Einleitung einer hohen Last in die Klebschicht ermöglicht. Zum Prüfen der Anbindungsqualität wird das Gewebe vom Bauteil abgeschält, was lokal zu einer starken Belastung der Klebung und zu sukzessivem Aufbrechen des Klebstoffs führt. Das resultierende Bruchbild und der Verlauf der Abzugskraft zeigen dabei etwaige Defekte an. Durch diese mechanische Prüfung ist die Festigkeit des applizierten Klebstoffs quantifizierbar und die Anhaftung an das Bauteil ist vollflächig validiert.

## Zwei Funktionen in einem Verfahrensschritt

Neben der Detektion von Schwachstellen in der Klebung erfüllt der Prüfvorgang gleichzeitig eine weitere wichtige Funktion: Durch das Aufbrechen weist die auf der Bauteiloberfläche zurückbleibende Klebstoffschicht eine garantiert saubere und chemisch aktivierte Oberfläche auf. Auf diese optimierte Oberfläche kann ein Reparaturflicken mit reproduzierbarer Qualität geklebt werden. Durch benachbart angebrachte Prüfkörper ist dieser zweite Verklebungsschritt ebenfalls abgesichert. Unter Anwendung der vorgestellten Prüfmethodik ist der erforderliche Festigkeitsnachweis für Reparaturklebungen erbracht. Dies eröffnet die Möglichkeit, das strukturelle Kleben im Rahmen geltender Sicherheitsbestimmungen in der Luftfahrt einzusetzen.



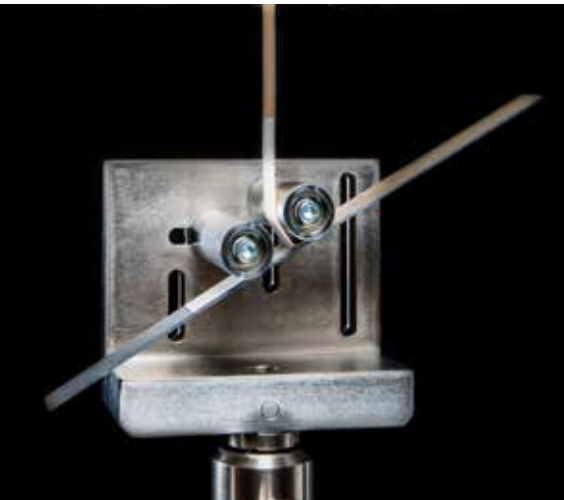
Mechanische Untersuchung eines Probekörpers im Prüflabor  
Mechanical testing of a specimen in the test lab

Autor:  
Dipl.-Ing. Lennert Heilmann



Rollenschälvorrichtung zur mechanischen Charakterisierung von Prüfkörpern

Roller peeling device for the mechanical characterisation of test coupons





# Integration von Kabine, Struktur und Systemen für den Rumpf der Zukunft

Integration of cabin, airframe and systems for the fuselage of the future

**Der Prozess der Rumpffertigung für heutige Kurzstreckenflugzeuge ist geprägt von sehr kostspieligen Prozessen. Dabei wird zunächst die Struktur gefertigt, bevor die Kabinenelemente integriert werden. Den Abschluss bildet die Installation der Systeme. Der hier vorgestellte neue Produktionsprozess verbindet die bisher sequenziell abgelaufenen Fertigungsprozesse zu einem ganzheitlichen Ansatz, bei dem bereits während der Strukturfertigung Möglichkeiten der Kabinen- und Systemintegration weitergedacht werden. Damit können nicht nur die wiederkehrenden Kosten gesenkt werden (lead time ! ) sondern auch die Produktionsrate erhöht sowie Einsparungen bei der Rumpfmasse gewonnen werden.**

## Summary

Nowadays, the production of short-range, single aisle fuselages is driven by very time consuming and costly processes which are sequentially executed. Firstly, the airframe structure is assembled. Secondly, the cabin elements are integrated and in a third step all the system functionalities are installed. The newly developed approach presented here is focused on a holistic production process. In parallel to the airframe production process, opportunities for cabin and system pre-installation as well as multi-ATA solution are faced to come up with a highly integrated and multifunctional future fuselage. Additionally, an Augmented Reality (AR) device based application was developed and implemented for visualization of the fuselage assembly process and to support respective assembly operators directly with expert's feedback in real time. Thus, the future fuselage assembly process could be optimized by lead time reduction and respective cost savings.

Unterstützung des Fertigungs- und Montageprozesses durch Augmented Reality (AR)-Technologien  
Support of the production process by means of Augmented Reality (AR) techniques

## Neuartiges Fertigungskonzept

Nach einer Bestandsaufnahme der heutigen Produktions- und Fügekonzepte hinsichtlich ihrer Ratenfähigkeit sowie ihrer Kosten ist die Installation der systemischen Komponenten mit einer großen Anzahl von Einzelteilen einer der größten Kostentreiber.

Um zukünftig die bei Airbus geforderte Ratenfähigkeit von 60+ Flugzeugen pro Monat bei gleichzeitig geringeren Kosten sowie geringerer Masse zu ermöglichen, kommt CFK mit thermoplastischer Matrix (PEKK) zum Einsatz. Damit ist eine zeit- und kostensparende In-situ-Konsolidierung des Matrixharzes und die Fertigung möglichst großdimensionaler, systemisch und kabinenseitig vorinstallierter und multifunktionaler Rumpfbauteile möglich. Damit lässt sich zum einen die Anzahl zu fügender Einzelteile signifikant verringern, zum anderen sinkt die Anzahl an Fügestellen in Rumpflängs- und -querrichtung erheblich. Die Vorinstallation der Rumpfbauteile ist aber nur zulässig, wenn innerhalb der Major-Component-Assembly (MCA) und Final-Assembly-Line (FAL) spanfreie Fügeverfahren, wie das thermoplastische Schweißen, zum Schließen der Rumpflängs- und -quernähte zum Einsatz kommen. Dies wird durch eine lokale Hybridisierung des Materials ermöglicht.



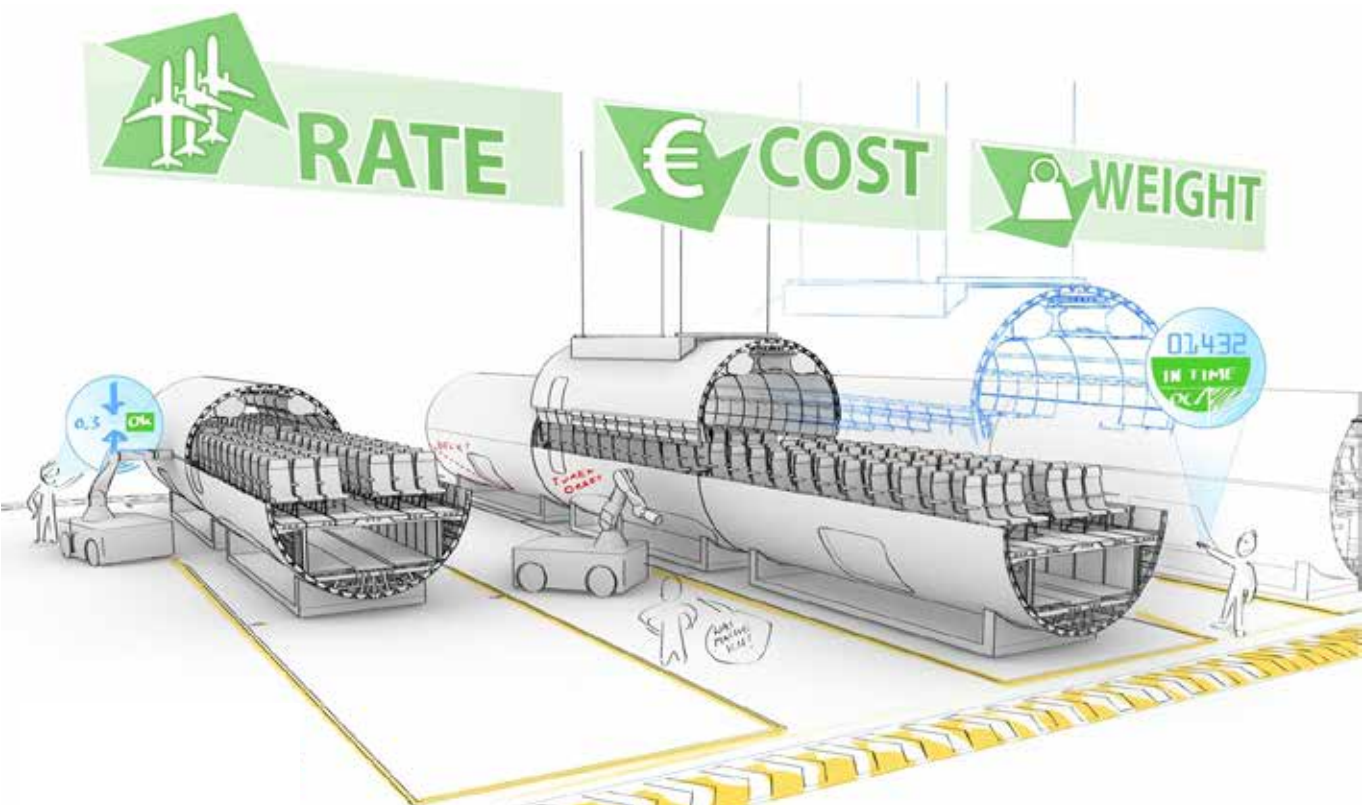
## Industrie 4.0

Augmented Reality (AR)-Techniken kommen zur Visualisierung der konstruktiven Details der Rumpfproduktion zum Einsatz. Eine selbst entwickelte Applikation für eine AR-Brille dient dabei als Werkzeug, um zukünftige Montageprozesse in der MCA und FAL darzustellen. Die grundsätzliche Montagereihenfolge und der Ausbau der Elemente mit Systemen und Interieur werden abgebildet. Zur weiteren Unterstützung des potenziellen Werkers bietet die Applikation die immersive Darstellung der originalen Größenverhältnisse des Rumpfes und zusätzliche Informationen an expliziten Orten der Konstruktion in Form kommentierter Schautafeln. Die mögliche Echtzeitinteraktion des Werkers mit Experten bietet dabei die Möglichkeit zukünftiger ortsunabhängiger Wartungs- und Reparaturstrategien.

Autor:  
Dr.-Ing. Janko Kreikemeier



Fertigungs- und Montageprozess der vorinstallierten und multifunktionalen Flugzeugrumpfbauteile  
Optimized production process of pre-installed and multifunctional fuselage parts





# Flugversuch am Boden – Validierung eines Laminarflügel-Demonstrators

*Flight testing on the ground – validation of a laminar flow wing demonstrator*

**Für ein neuartiges Anbindungskonzept der Vorderkante eines Laminarflügels entwickelt das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik einen speziellen Prüfstand. Die Tauglichkeit des Konzepts zur Einhaltung der hohen Anforderungen an die Oberflächengenauigkeit eines solchen Flügels soll dabei an einer eigens entworfenen Vorderkante nicht nur unter Labor-, sondern auch unter Reiseflugbedingungen und für den Reparaturfall gezeigt werden. Ein neues Optimierungsverfahren für Prüfstandstrukturen ermöglicht dazu die Abbildung realer Strukturverformungen im Labor. So kann schon vor dem Erstflug sichergestellt werden, dass der Laminarflügel die erwarteten Treibstoffeinsparungen von acht Prozent auch im Betrieb erreicht.**

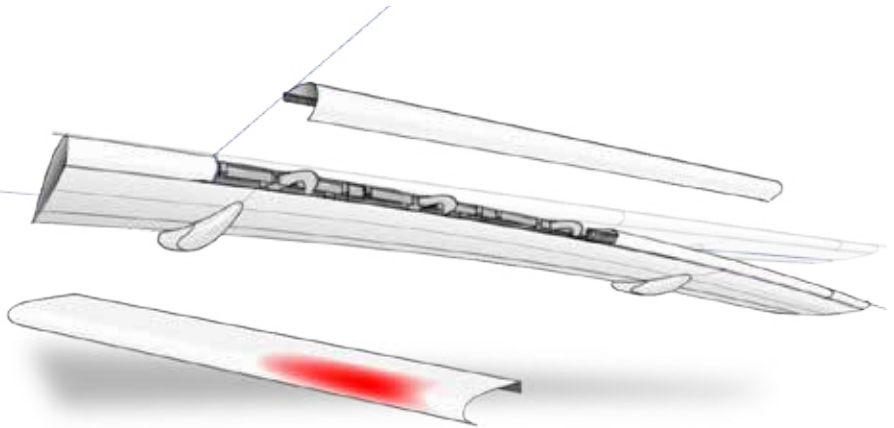
## Summary

*To address the topic of interchangeability for a wing leading edge in the challenging natural laminar flow environment, a novel leading edge design was developed. The concept is to be validated in a test rig. To show compliance with laminar flow requirements under cruise flight conditions and to demonstrate interchangeability under real life on ground conditions, a novel optimisation process is needed for the test rig. For the “wing on ground” and “cruise flight” test cases, a test rig substructure was optimised to support the surface of the leading edge to be bent into those target deformations. Surrogate ribs and spar of the substructure will connect the wing cover and the load-inducing actuators of the test rig. With this setup, interchange trials under wing on ground deformations will be possible as well as step height measurements under cruise deformation.*

Verhindern, dass die Strömung „stolpert“

Um den hohen Anforderungen einer laminaren Strömung gerecht zu werden, weist die entwickelte Flügelvorderkante ein Anbindungskonzept auf, das frei von Störungen der Strömungsoberfläche ist. Die Fügestelle zwischen Vorderkante und Flügelschale weist durch geschickte Auswahl der Fertigungsprozesse eine möglichst kleine Stufe auf, die wenige Zehntel Millimeter nicht überschreiten darf. Durch Verlegung der Verbindung auf die Innenseite der Struktur bleibt die Strömungsoberfläche frei von Nieten (vgl. Steffen; Ückert: *M<sup>3</sup>F Flügelvorderkante für den laminaren Flügel*, S.35/36. Innovationsbericht 2015, Seite 35). Die Vorderkante muss dabei aber auch austauschbar bleiben – nicht nur unter den Bedingungen der Erstmontage in einer klimatisierten Werkhalle, sondern auch zur Reparatur weltweit.

Der Austausch muss daher auch einfach möglich sein, wenn das Flugzeug am Boden steht und der Flügel unter seiner eigenen Masse durchgebogen ist. Um nachzuweisen, dass die Vorderkante auch bei einer Montage unter solchen Betriebseinflüssen die Anforderungen an den Laminarflügel erfüllt, ist ein spezieller Prüfstand notwendig. Herausfordernd ist dabei die Abbildung der Verformungen aus verteilten Lasten im realen Betrieb durch diskrete Lasten im Labor.



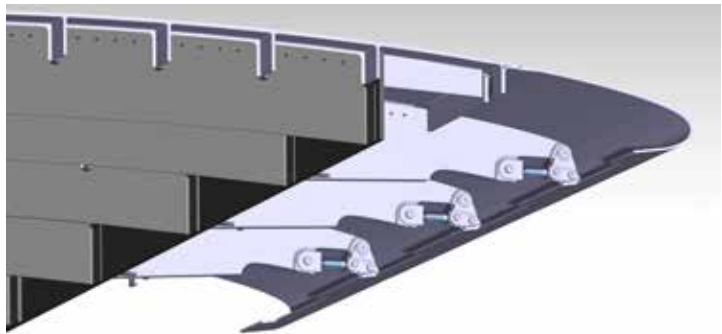
Der Austausch einer beschädigten Flügelvorderkante muss weltweit ohne spezialisierte Wartungsbetriebe möglich sein. Das heißt, die Flügelvorderkante muss sich der momentanen Flügelverformung anpassen können.

*Leading edge interchange has to be possible worldwide, even when specialised maintenance organisations are not at hand. Thus, the leading edge needs to be flexible enough to match current wing deformations.*

## Aus der Luft ins Labor – der Prüfstand

Eine neuartige Optimierung liefert für die zu verformenden realen Bauteile nach Vorgabe einer Zielverformung Informationen über die dazu notwendige Unterbaustuktur. Für die Zustände „Flügel am Boden“ und „Reiseflug“ hat die Optimierung des Prüfstands Lagenaufbauten für eine Rippen- und Holmstruktur, Aktuatorzahl, Kraftrichtungen und Verschiebungen geliefert. Rippen und Holme sind hierbei Ersatzstrukturen, die als Ergebnis der Optimierung die Lasteinleitung durch die Aktuatoren in eine realitätsnahe Verformung der Vorderkante übersetzen helfen. Diese Prüfstandstruktur ermöglicht so Austauschversuche, die zeigen, dass die Vorderkante mit ihrem Anbindungskonzept auch nach einem Tausch noch die an sie gestellten Anforderungen im Reiseflug erfüllt.

Autor:  
Olaf Steffen



Die neu entwickelte Flügelvorderkante wird ihre Eignung für den Laminarflügel in einer Versuchsreihe 2019 unter Beweis stellen

*The laminar leading edge and its novel attachment; their suitability for the laminar wing will be demonstrated in a test campaign in 2019*



Dank seiner speziell optimierten Unterstruktur kann der Prüfstand die Deformationszustände des Flügels am Boden und im Reiseflug abbilden

*Thanks to its specially optimised substructure, the test rig can depict the deformation states of the wing on the ground and in cruise flight*



# Produktionsgerechte Konstruktion von Flügelschalen

*Production-optimised design for efficient wing cover manufacturing*

## Summary

*In order to achieve an efficient production process of CFRP wing covers, all process steps have been addressed within the project EWiMa, which has been funded by the German government in the national research program LuFo V-1.*

*The design process has been turned topsy-turvy, as every ply shape is designed to consider the constraints of the production process. By avoiding uncomplete courses of the fibre placement heads and skilfully staggering the additional plies within reinforcements, the layup time has been reduced by 5 per cent.*

*The layup of a 15-square-meter wing cover has been performed with two simultaneously working fibre placement platforms on a vertical tool, using a plasma-coated separating foil.*

*For the curing process, an electrically heatable tool is integrated in the control system of the autoclave, which enhances curing speed and homogeneity.*

**Die Optimierung des Produktionsprozesses lässt die Herstellzeiten und -kosten von Flügelschalen in CFK-Bauweise drastisch sinken. Allein die frühzeitige Berücksichtigung von Produktionsrandbedingungen bei der Detailkonstruktion reduziert die Fertigungszeit um fünf Prozent.**

## Optimierung aller Einzelprozesse

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat im Projekt EWiMa (Efficient Wing-cover Manufacturing) Methoden und Prozesse zur effizienten Fertigung von Flügelschalen in CFK-Bauweise entwickelt und erprobt.

Von der Auslegung und Konstruktion über die automatisierte Faserablage bis zur Aushärtung einer Flügelschale stand in EWiMa die gesamte Prozesskette auf dem Prüfstand. Die Faserablage erfolgte erstmals mit zwei simultan arbeitenden Legeplattformen im Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) Stade auf einem vertikalen Formwerkzeug. Zur anschließenden Aushärtung lässt sich ein aktiv heizbares Formwerkzeug in CFK-Bauweise in die Steuerung des Forschungsautoklaven einbinden (vgl. Delisle; Uçan; Schreiber: *Schneller geht's im Team! Effiziente Fertigung von Flügelschalen*, Innovationsbericht 2017, Seite 82).

Neben der Flügelhaut befassten sich weitere Arbeitspakete mit der effizienten Herstellung der Stringerversteifungen sowie mit einer Analyse der automatischen Trockenfaserablage hinsichtlich der Auswirkungen von Legeparametern auf den nachfolgenden Infusionsprozess. Das Projekt wurde im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms der Bundesregierung LuFo 5-1 vom BMWi gefördert und erfolgte in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Airbus und Fibretech Composites sowie mit den Forschern der Fraunhofer-Gesellschaft (FhG IFAM).

## Konstruktion für die Fertigung

Der Bauteilentwurf erfuhr eine gründliche Überarbeitung, wobei die Anforderungen, die sich aus der Fertigung ergeben, nun von Anfang an konsequent Berücksichtigung fanden. Gegenüber einem mit konventionellen Entwurfsmethoden konstruierten Referenzbauteil ist die benötigte Zeit für die Faserablage etwa fünf Prozent kürzer, ohne dabei Einbußen bei der Festigkeit oder höhere Bauteilgewichte zu erzielen.

Die Umrisse jeder Faserlage sind so gestaltet, dass sie mit minimalem Verschnitt und ohne zusätzliche Schneidvorgänge vom Legekopf der Fibre-Placement-Anlage herstellbar sind. Damit reduzieren sich die mit dem Schneiden einzelner Faserbänder verbundenen Brems- und Anfahrvorgänge der Legeköpfe sowie die Anzahl benötigter Bahnen durch die effizientere Ausnutzung der verfügbaren Legebreite.

Zwischen unterschiedlich dicken Laminatbereichen einer Flügelschale bestehen rampenartige Übergänge. Anstelle einer gleichmäßigen Abstufung der Zusatzlagen entstehen diese Rampen bei der produktionsgerechten Konstruktion durch geschickte Verschachtelung der optimierten Einzellagen.



Die fertige Flügelschalenhaut  
*The finished wing cover*

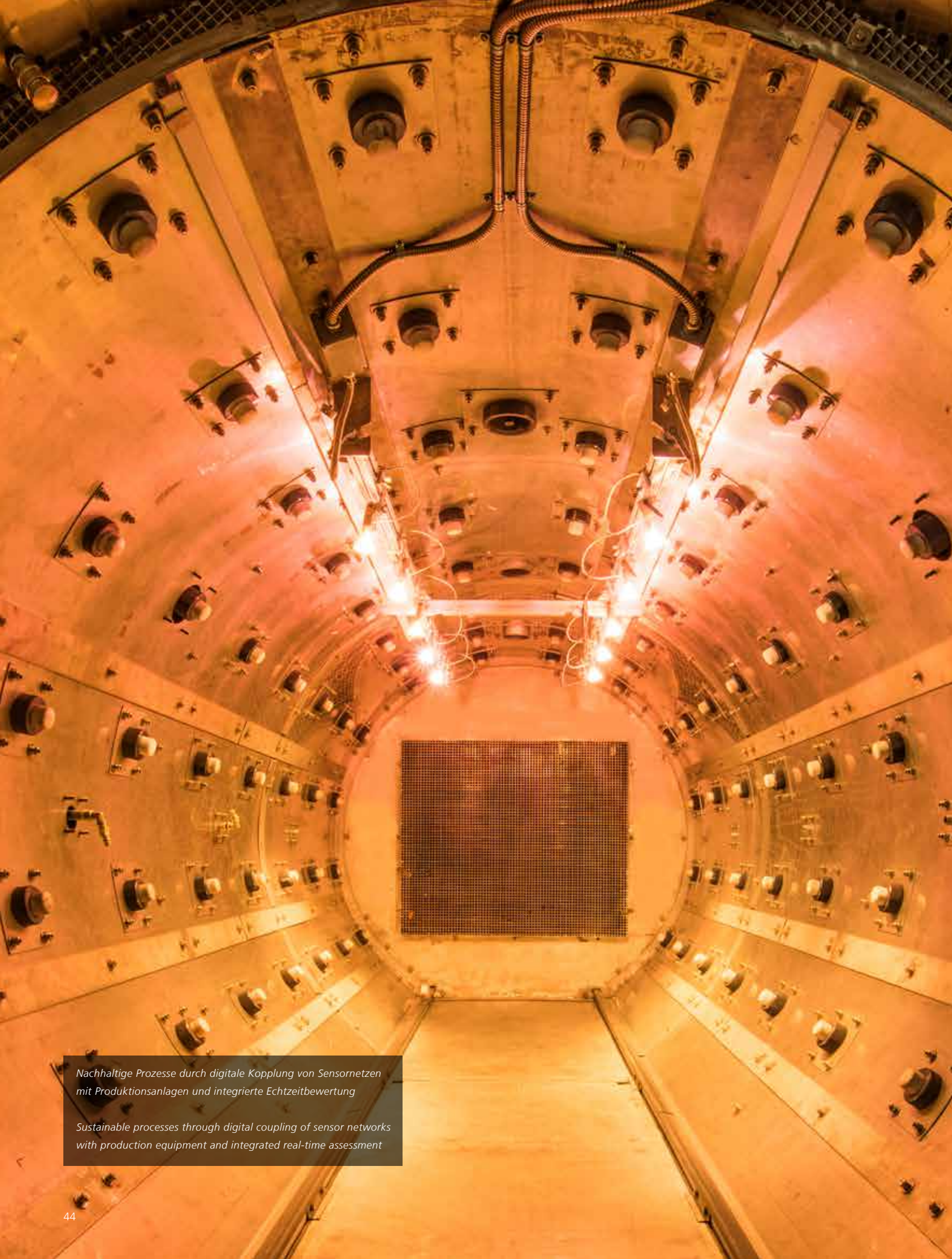
Beheizbares Werkzeug im Autoklav  
*Heatable tool inside the autoclave*



Autor:  
Christian Ückert







Nachhaltige Prozesse durch digitale Kopplung von Sensornetzen  
mit Produktionsanlagen und integrierte Echtzeitbewertung

Sustainable processes through digital coupling of sensor networks  
with production equipment and integrated real-time assessment

## Fertigung

### Production

Neue Anlagentechnologie zur Fertigung hybrider CFK-Stahl-Profile <i>New plant technology for the production of hybrid profiles of CFRP and steel</i>	46
Montage 4.0 – flexibel aufgenommen, präzise montiert <i>Assembly 4.0 - flexibly picked up, precisely mounted</i>	48
Effektive Fertigungszyklen für CFK-Strukturen durch hybride Formwerkzeugtemperierung <i>Effective manufacturing cycles for CFRP structures through hybrid mould tempering</i>	50
Virtuelle Assistenzsysteme zur Wartung von Luftfahrzeugkomponenten <i>Virtual assistance systems for maintenance of aircraft components</i>	52
AddCompS™ – 3D-Druck mit endlosen Kohlenstofffasern <i>AddCompS™ – 3D printing with endless carbon fibres</i>	54



# Neue Anlagentechnologie zur Fertigung hybrider CFK-Stahl-Profile

New plant technology for the production of hybrid profiles of CFRP and steel

Leichtbau ist eines der zentralen Themen für die Automobilindustrie. Im vom BMBF geförderten Projekt TRoPhy2 (Thermoplastische, rollgeformte Profile in Hybridbauweise 2) wurde daher eine Technologie entwickelt, bei der die effiziente Fertigungstechnologie des Rollformens zur Hybridprofilherstellung genutzt wird. Diese Hybridprofile sind für den Großserieneinsatz geeignete Bauteile aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) und Stahl. Unter wirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen ist diese Multi-Material-Bauweise interessant, da durch die Kombination metallischer Werkstoffe mit FKV die Bauteileigenschaften ideal abgestimmt werden können.

## CFK-Stahl-Hybridprofile

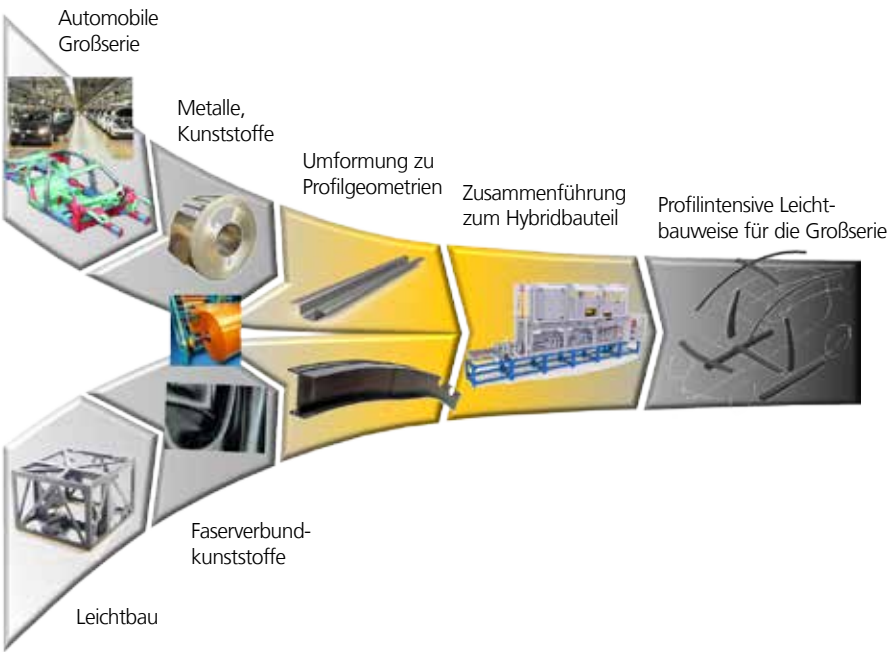
Mischbauweisen stellen für lasttragende Strukturen in der Großserie bislang ein Novum im Automobilbau dar und erfordern spezifisches Wissen bezüglich FKV, der Fügetechnologien und deren Fertigungstechnik. Durch die Verbindung von Stahl mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) und dem effizienten Rollformverfahren wird eine schnelle und günstige Herstellung von hybriden Profilen ermöglicht.

Im Projekt arbeiten die Industrieunternehmen Volkswagen AG, EDAG Engineering GmbH, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH und das KMU data M Sheet Metal Solutions GmbH mit den wissenschaftlichen Einrichtungen des Instituts für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig und dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) eng zusammen.

## Summary

Lightweight construction plays a central role in the automotive industry, so that the large-scale production of fibre composites is intensively pursued. Tailored multi-material structures of CFRP and steel offer high potentials considering lightweight design approaches in combination with efficient manufacturing processes in order to achieve this goal. The roll-forming process enables a flexible large-scale production of hybrid structures due to the continuous manufacturing process as well as a high degree of automation. The BMBF-funded project TRoPhy2 aims at solutions for surface pre-treatment of steel substrates as well as production process parameters. The production process is simulated, tested, optimised and validated to develop a plant technology for the production of hybrid CFRP-steel profiles. The DLR is currently setting up this innovative plant technology within the framework of the "Open Hybrid LabFactory" in Wolfsburg.

Hybridrollformprozess; Anforderungen der Großserie und des Leichtbaus erfordern hochproduktive Kombinationen aus schnellen Fertigungstechnologien mit verschiedenen Materialien zur Produktion optimierter Leichtbauprofile  
Hybrid roll forming process; high volume and lightweight requirements call for highly productive combinations of fast manufacturing technologies with different materials to produce optimised lightweight profiles



Gemeinsam wurden Lösungen zur Oberflächenvorbehandlung der Stahlsubstrate sowie Prozessparameter der Fertigung simuliert, getestet, optimiert und validiert. Auch das Bauteildesign, im Projekt ein Sitzquerträger, wurde optimiert, sodass mit dem hybriden CFK-Stahl-Werkstoff eine Gewichtsersparnis von über 20 Prozent realisiert werden kann.

## Bauteilfamilien einfach realisierbar

Der große Vorteil rollgeformter Bauteile aus CFK und Stahl besteht darin, dass Bauteilfamilien mit unterschiedlichen Wandstärken einfach realisierbar sind. Wo in Pressprozessen für jede Komponente einer Bauteilfamilie jeweils ein spezifischer Pressenwerkzeugsatz benötigt wird, kann mit dem Hybrid-Rollformen in einer Anlage die komplette Bauteilfamilie ohne nennenswerten Rüstaufwand produziert werden.

Eine solche industrienähe Produktionsanlage wurde im Projekt konzipiert und ausgelegt. Mit Unterstützung einer EFRE-Förderung baut das DLR diese Hybrid-Rollform-Anlage im Forschungscampus Open Hybrid Labfactory in Wolfsburg auf, um damit langfristig zusammen mit den Partnern im Forschungscampus weiter auf dem Gebiet des Hybridrollformens zu forschen.

Autor:  
Dipl.-Ing. Heiko Assing



Hybridrollformanlage (rechts: Halbzeugspeicher; Mitte: Ofen mit Umformungseinheit und Rollenpresse; links: Kaltrollenpresse und Fertigteil-speicher)  
Hybrid roll forming line (right: semi-finished product storage; middle: furnace with forming unit and roller press; left: cold rolling press and finished part storage)





# Montage 4.0 – flexibel aufgenommen, präzise montiert

Assembly 4.0 – flexibly picked up, precisely mounted

Abweichungen im Fertigungsprozess können bei der Montage zu enormen Kosten führen. Um diese Kosten zu reduzieren, wird ein formflexibles Montagegestell eingesetzt, das eine elastische Verformung des Bauteils über Aktoren ermöglicht. Das System kann durch den Einsatz am Roboter überall eingesetzt werden und Bauteile durch eine elastische Verformung in Montageposition bringen („überführen“). Die individuell konfigurierbare Fügevorrichtung gleicht Fertigungsabweichungen bei der Montage im elastischen Bereich aus. Dies funktioniert über ein Echtzeit-Messsystem und mit einer variablen Anzahl von Aktoren. Durch das elastische Verformen des Bauteils in seine Sollgeometrie erfolgt eine effektivere und schnellere Montage.

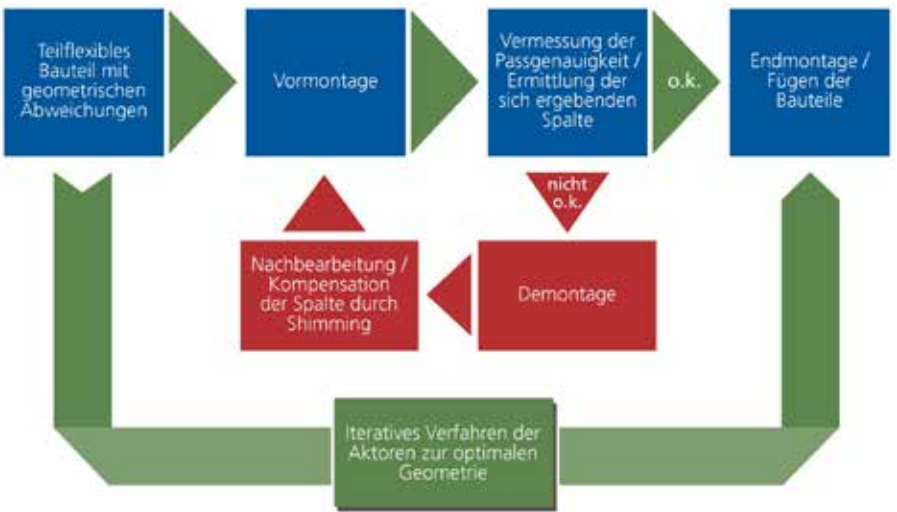
## Summary

Deviations in the production process can lead to enormous costs during assembly. To reduce these costs, a flexible mounting frame which allows for elastic deformation of the component via actuators is used. Individually configurable joining devices compensate manufacturing deviations in the elastic range by using a real-time measuring system and a variable number of actuators. An industrial robot equipped with the mounting frame brings the component into the assembly position. By elastically deforming the component to its original ideal shape, a more effective and faster assembly takes place.

## Fertigungsprozess mit Abweichungen

Form- und Lageabweichungen bedingt durch innere Spannungen sind meistens erst am fertigen Bauteil sichtbar. In den meisten Fällen liegen diese Abweichungen im Toleranzbereich. Bereits kleine Abweichungen verursachen bei der Nachbearbeitung und Endmontage solcher Bauteile einen großen zeitlichen und somit wirtschaftlichen Aufwand. Nach der Qualitätsprüfung werden heutzutage die einzelnen Bauteile zunächst provisorisch zusammengefügt und die Passgenauigkeit der Bauteile zueinander ermittelt. Befinden sich die Bauteile in einem für die Endmontage akzeptablen Toleranzbereich, werden diese im nächsten Schritt zusammengefügt. Andernfalls folgt eine aufwändige Nacharbeit. Anschließend werden die Prozessschritte erneut durchlaufen, bis die Montagetoleranzen erreicht werden. Um diese zeitintensive und kostspielige Prozessschleife zu vermeiden, wird das formflexible Montagegestell, das mit einem Echtzeitmesssystem gekoppelt ist, genutzt, um den Montageprozess zu optimieren.

Montageprozess für einen Flugzeugflügel aus Faserverbundkunststoffen  
Assembly process for an aircraft wing made of fibre-reinforced plastics



## Formflexibles Montagegestell

Das formflexible Montagegestell kann überall dort eingesetzt werden, wo große und komplexe Bauteile (z. B. aus CFK, GFK, Kunststoff, Metall usw.) unter Berücksichtigung von exakten Form- und Lagetoleranzen zueinander ausgerichtet und montiert werden sollen. Das an einer mobilen Roboterplattform (Kuka OmniMove) montierte Gestell kann die Montage von Faserverbundbauteilen entscheidend vereinfachen. Das Montagegestell besteht aus teleskopierbaren CFK-Rohren. Drei Rohre mit 60 Millimeter Außendurchmesser und einer Wandstärke von 5 Millimeter dienen horizontal als Querträger. Sie sind 2.000 Millimeter lang und können optional auf 4.000 Millimeter ausgezogen werden. An diese Biegeträger werden Teleskoprohre als Tragwerk angeordnet. Die Rohre haben einen Durchmesser von 258 Millimeter eine Wandstärke von 0,5 Millimeter. Sie können von einer Länge von 1.000 Millimeter auf 2.000 Millimeter ausgezogen werden. Sie werden mittels 3D-gedruckten zweiteiligen T-Hülsenelementen am Querträger montiert. Linearaktoren verformen das Bauteil im elastischen Bereich. Angeschlossene Vakuumsauger halten das Bauteil sicher am Montagegestell. Nach Aufnahme und Verformung im elastischen Bereich wird das Bauteil in Soll-Geometrie zur Montage transportiert und eingebaut.

Die Validierung des Montagegestells erfolgte im Projekt NACOR, in dem eine Flügeloberschale stufenweise vermessen und aktuiert wurde, um die Sollgeometrie so gut wie möglich zu erreichen.

Mobiler Roboter mit modulare, formflexiblem Montagegestell  
Mobile robot with modular flexible mounting frame



Autor:  
Dipl.-Ing. Matthias Bock



Aufgenommene Flügeloberschale im Montageprozess  
Wing cover on the mounting frame during the assembly process





# Effektive Fertigungszyklen für CFK-Strukturen durch hybride Formwerkzeugtemperierung

Effective manufacturing cycles for CFRP structures through hybrid mould tempering

Die hybride Formwerkzeugtemperierung kombiniert zwei Temperierverfahren (fluid- & konvektionsgestützt) und bietet die Möglichkeit, Fertigungszyklen von CFK-Strukturen effizienter und somit schneller durchzuführen. Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts EFFICOMP (EFFicient COMposite manufacturing of aircraft structures) wurde die Anwendung eines wassertemperierten Formwerkzeugs im Inneren eines Autoklaven erprobt. Vorteilhaft hierbei ist das Einbringen höherer Heiz- und Kühlraten direkt in das Formwerkzeug, die allein durch Konvektion der Autoklavwärme nicht erreicht werden. Gleichzeitig kann hierbei aber auch der Autoklavdruck zur Variation der Lamineigenschaften verwendet werden. Des Weiteren sind durch einen wesentlich effektiveren und schnelleren Fertigungsprozess kostbare Ressourcen und somit auch Kosten einzusparen.

## Summary

Hybrid mould tempering offers the possibility to carry out production cycles of CFRP structures much more efficiently and faster. The EU-funded project EFFICOMP (EFFicient COMposite manufacturing of aircraft structures) tested the use of a water-tempered mould inside an autoclave. The advantage of this is the introduction of higher heating and cooling rates directly into the mould, which cannot be achieved solely by convection. At the same time, the autoclave pressure can be used to vary the laminate properties. Furthermore, a much more effective and faster manufacturing process saves valuable resources and thus costs.

## Hybride Werkzeugtemperierung

Die hybride Temperierung ist ein neuartiges Temperierverfahren zur Aushärtung von CFK-Bauteilen, bei dem eine wasserbeheizte Form in einem Autoklaven eingesetzt wird. Die Idee besteht darin, die Vorteile zweier Technologien zu kombinieren. Auf der einen Seite kann die wasserbeheizte Form Energie lokal und effizient in das Bauteil einbringen und den Temperierprozess damit massiv beschleunigen. Auf der anderen Seite können zeitgleich die vom Autoklaven erzeugte Wärme sowie der Autoklavdruck verwendet werden, um eine gute Bauteilqualität sowohl für Prepreg- als auch für Infusionsbauteile sicherzustellen. Der Standard-Autoklav-Prozess für die Aushärtung von RTM6 mit einer Heiz- und Kühlrate von zwei Kelvin pro Minute dient hierbei als Referenz.



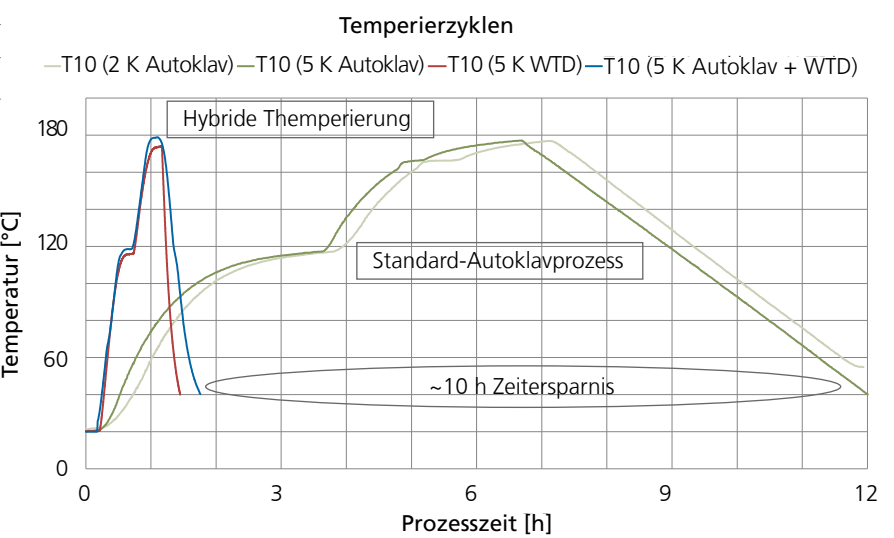
Wasserbeheiztes Formwerkzeug im Autoklaven  
Water tempered tool in an autoclave environment

Dieser wird mit der Stand-alone-Wassertemperierung (out-of-autoclave) sowie der hybriden Temperierung im Autoklaven verglichen. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass die wassertemperierten Prozesse den Standard-Temperierprozess im Autoklaven um etwa zehn Stunden verkürzen.

## Validierung in der Bauteilfertigung

Das eigentliche Potenzial der Wassertemperierung liegt im Erreichen hoher Heiz- und Kühlraten. Deren Einflüsse auf die Bauteilqualität wurden in drei Testreihen (2, 5, 10 Kelvin pro Minute) à vier Bauteile mit verschiedenen Laminatdicken (3, 5, 7, 11 Millimeter) untersucht. Der Fertigungsprozess konnte aufgrund der Erhöhung der Heizraten noch einmal um circa eine Stunde verkürzt werden. Bezüglich der Bauteilqualität konnten keine Nachteile festgestellt werden. Dickenmessungen, Schliffproben und eine optische Vermessung zeigten keine Unterschiede in den Laminat- und Geometrieigenschaften der einzelnen Bauteile. Untersuchungen zu Festigkeiten stehen noch aus. Um den Ressourcenverbrauch der einzelnen Temperierprozesse aufzeigen und bewerten zu können, erfolgt die Überwachung mit einer Weiterentwicklung der Smart Work Station (vgl. Al-Lami: *Smart-Work-Station (SWS) – Kostenbewertung in Echtzeit*, Innovationsbericht 2017, Seite 62). Kosten und Nutzen können somit gegenübergestellt werden. Fertigungsprozesse mit hybrider Temperierung im Autoklaven sind kosten- und ressourcenschonender im Vergleich zum Standard-RTM6-Autoklavprozess. Mit zunehmenden Heiz- und Kühlraten verringert sich dieser Vorteil aber aufgrund der geringen Leistung der hier verwendeten Temperieranlage.

Autor:  
Manuel Buggisch, M.Eng.



Vergleich der Temperierzyklen (Autoklav, Wasser-Temperierungs-Gerät (WTD), Autoklav + WTD) ohne Infusions- und Aushärtezeiten  
Comparison of tempering cycles (autoclave, water tempering device (WTD), autoclave + WTD) without infusion and curing times



# Virtuelle Assistenzsysteme zur Wartung von Luftfahrzeugkomponenten

Virtual assistance systems for the maintenance of aircraft components

Das Projekt erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der DLR-Einrichtung Simulations- und Softwaretechnik (SC)  
*The project is run in close cooperation with the DLR facility of Simulation and Software Technology (SC)*

Die Analyse eines im Betrieb befindlichen Luftfahrzeugs auf Grundlage aller seiner lebenslang gesammelten Daten und mit Experten, die sich an unterschiedlichen Orten der Welt aufhalten können – das ist die Idee, die in der hier vorgestellten Studie in einem ersten Schritt umgesetzt wurde. Vor dem Hintergrund der Möglichkeiten von Industrie 4.0 erforschen wir die Eignung virtueller Assistenzsysteme zur Führung und Dokumentation manueller Prozesse in der Produktion, dem Betrieb, der Wartung und der Reparatur von Luftfahrtbauteilen. Das Ziel ist die Erhöhung der Effizienz von Luftfahrzeugen über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

## Summary

Data generated during the development, production and operation of a component can be interpreted as a "digital twin". In this experimental study, a HMD is used to display and analyse the virtual 3D data in a real environment (mixed reality). The following aspects were addressed in the implementation of a surface inspection scenario.

- Menu-guided instructions and documentation of the maintenance activity
- Analysis of abnormal findings on the Airbrake surface in virtual meetings with external experts
- Deriving new information by combining location-dependent properties and analyses from the "digital twin" database.

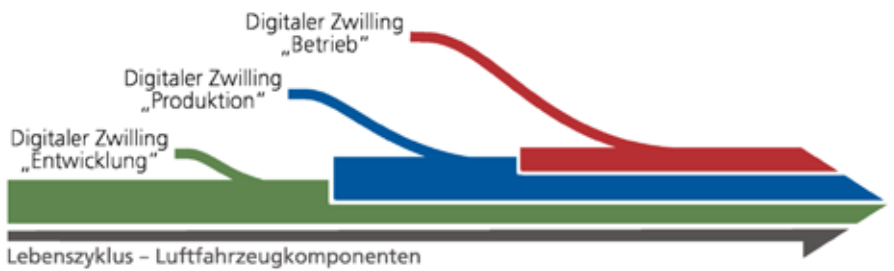
## Der virtuelle Zwilling wird sichtbar

Von jedem Bauteil existiert auch heute schon eine große Menge von Daten, die im Laufe der Lebensspanne eines Luftfahrzeugs anfallen. Damit diese Daten der Idee des digitalen Zwillings gerecht werden können, müssen sie in einem definierten Format gespeichert und für den Zugriff von jedem beliebigen Ort durch jede autorisierte Person oder jedes Gerät verfügbar sein. Diese Eigenschaften ermöglichen die beliebige Kombination und Auswertung der Daten. Mit Hilfe von „Head Mounted Displays“ (HMDs) wird diese Kombination von Daten persönlich erfahrbar und kann über Datenverbindung mit anderen Personen geteilt werden. In einer experimentellen Studie wird dazu ein HMD zur Darstellung virtueller Objekte in einer realen Umgebung genutzt (Mixed Reality, MR). Das verwendete Gerät verfügt neben dem Darstellungssystem über ein kamerabasiertes, autonomes Raumortungssystem. Dieses ermöglicht bei der Visualisierung im HMD die Koordination der Lage eines virtuellen Abbilds eines Bauteils mit der Lage des Bauteils selbst.



HMD-unterstützte Dokumentation eines Impact-Schadens an einer CFK-Airbrake des Eurofighters in einem Wartungs-Hangar durch einen Luftfahrtprüfer. Der Prüfer steht über das HMD in Verbindung mit einem Experten im Herstellungsbetrieb.

*HMD-supported documentation of an impact damage to a CFRP airbrake of the Eurofighter on site in a maintenance hangar by an aviation inspector. The examiner is in contact with a manufacturer via the HMD.*



Stetige Akkumulation von Daten und Informationen aus den verschiedenen Abschnitten des Lebenszyklus einer Luftfahrzeugkomponente, die in ihrer Gesamtheit als digitalen Zwilling definiert werden kann  
*Continuous accumulation of data and information along the various stages of an aircraft's life cycle. That can be defined in its entirety as a digital twin.*

## Oberflächeninspektion einer Airbrake

In der Anwendungsstudie eines Assistenzsystems zur Oberflächeninspektion einer CFK-Airbrake des Eurofighters EF 2000T "Typhoon" wurden folgende Aspekte thematisiert:

- Menügeführte Anleitung und Dokumentation der Inspektionstätigkeit
- Analyse von Auffälligkeiten der Airbrake-Oberfläche in virtuellen Besprechungen mit externen Experten
- Ableitung von neuen Informationen aus einer Kombination von ortsabhängigen Eigenschaften und Analysen aus der Datenbank des "Digital Twin"

In dieser Studie konnte plausibel nachgestellt werden, wie eine Begutachtung eines Impact-Schadens an der Airbrake in einem virtuellen Expertenmeeting ohne großen Zeitverlust zu einer Fortsetzung des Flugbetriebs führen kann. Die Studie brachte darüber hinaus neue Ideen für die Integration von weiteren Analysefunktionen und neue Anwendungen für Assistenzsysteme in Verbindung mit HMDs.



Autoren:  
Dr.-Ing. Robert Kaps  
Sebastian Utzig, M.Sc (DLR-SC)



Analyse des vom Prüfer vor Ort dokumentierten Impact-Schadens an der Airbrake mit Hilfe eines HMDs und Diskussion mit dem Prüfer über das weitere Vorgehen. Der Prüfer ist als simplifizierter Avatar rechts mit dem roten Sichtstrahl sichtbar.

*Analysis of an impact damage on the airbrake documented by the inspector on site. A manufacturer discusses with the inspector about the further procedure. The examiner is visible as a simplified avatar with the red line of sight on the right.*



# AddCompS™ – 3D-Druck mit endlosen Kohlenstofffasern

AddCompS™ – 3D printing with endless carbon fibres

## Summary

The newly developed printing head for Additive Composite Structures (AddCompS™) is a centre piece in producing free-formed reinforced plastics with endless carbon fibre from standard materials. This heavy-duty and load-optimal lightweight structures are manufactured in a cost-saving and efficient manner using a 3D-printing process. In the fast developing markets of mobility, this process defines the basis of a new technology: producing highly integrated fibre-reinforced plastics using large-scale industrial robots. The new AddCompS™ printing head manufactures multi-material structures composed of up to three different thermoplastics. Where needed, carbon fibres are additionally integrated. Fibre-reinforced structures are even manufactured out-of-plain (real 3D-printing) so that the loads are optimally carried. The 3D-printed parts with carbon-fibre reinforcement proved to be more than seven times stiffer than their pure plastic counterparts. Future work will focus on the processing of novel materials.

Zugversuche mit unverstärkten und endlosfaser-verstärkten, gedruckten Zugproben  
Tensile testing of endless fibre-reinforced and non-reinforced 3D-printed test specimens

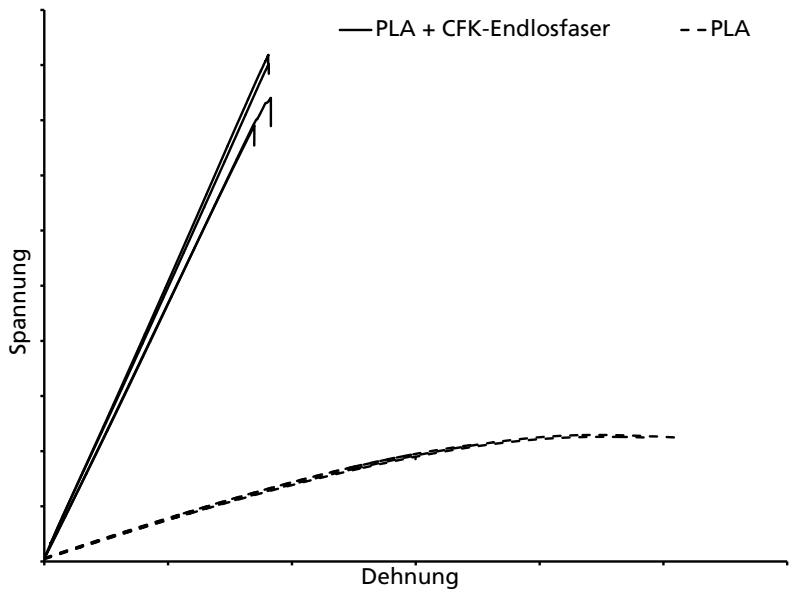
Mit der Entwicklung des 3D-Druckkopfes für additive Kompositstrukturen (AddCompS™) ist erstmals die Herstellung von endlosfaserverstärkten Freiformbauteilen aus Industriehalbzeugen gelungen.

Hoch belastbare und lastoptimale Leichtbaustrukturen entstehen hiermit kostensparend und effizient im 3D-Druckverfahren. Den Zukunftsmärkten der Mobilität eröffnet sich mit diesem Ansatz eine neue Produktionstechnologie, die es ermöglicht, hochintegrale, faserverstärkte Bauteile mit großformatigen Industrierobotern zu fertigen.

## Lastoptimal in 3D

Die Forschungsarbeiten innerhalb von AddCompS™ umfassen ein weites Feld (vgl. Monner; Riemenschneider: AddCompS™ – Additive Composite Structures, Innovationsbericht 2017, Seite 12), in dem die Entwicklung des neuen Druckkopfes eine zentrale Rolle einnimmt. Schwerpunkte bilden Untersuchungen zur Verarbeitung der zugeführten Materialien, zur Prozesssteuerung während des 3D-Drucks, zur Integration des Druckkopfes in bestehende Anlagen der robotischen Fertigung sowie zur Qualifizierung gedruckter Bauteile.

Der neue Druckkopf verarbeitet aktuell bis zu drei unterschiedliche thermoplastische Kunststoffe und einen endlosen Kohlenstofffaserstrang (Roving). Es lassen sich somit multimaterielle Strukturen herstellen, die entweder vollständig oder nur in Teilbereichen eine Faserverstärkung enthalten. Gleichzeitig ist es möglich, Fasern aus der Ebene heraus abzulegen (echter 3D-Druck), um sie lastoptimal entlang der größten Belastungen im Bauteil einzubringen.



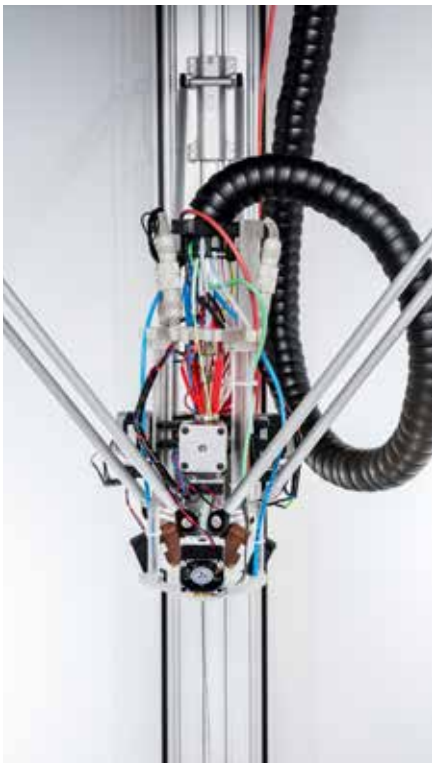
Dabei sind sogar größere Abschnitte ohne Stützstrukturen und Bereiche entlang gekrümmter Oberflächen fertigbar. Ein speziell entwickeltes Verfahren, das aus dem 3D-Modell einer Struktur eine unterbrechungsfreie Druckkopfbewegung berechnet, ermöglicht die Verarbeitung des endlosen Fasermaterials.

Auf der Seite des Druckkopfes sind insbesondere die Führung und Bereitstellung der Kohlefaser entscheidend. Innovative Lösungen wie die druckluftunterstützte Faserführung, die Erzeugung von hohen Temperaturgradienten in bestimmten Druckkopfbereichen oder die punktuelle Kühlung definierter Bauteilabschnitte ermöglichen eine optimale Handhabung des hochkomplexen Druckprozesses.

## Industrielle Fertigung

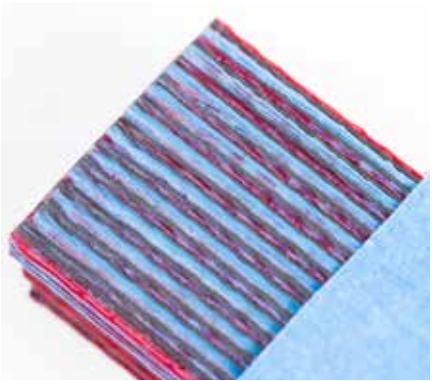
Um den Einsatz dieser Technologie für den industriellen Maßstab vorzubereiten, wird im Rahmen von AddCompS™ der 3D-Druck an der Großanlage zur robotischen Fertigung (vgl. Ückert: Das Projekt EWiMa (Efficient Wingcover Manufacturing) – Produktionsgerechte Konstruktion von Flügelschalen, Innovationsbericht 2018, S. 42 ) am Standort in Stade untersucht. Die stetige Weiterentwicklung des Druckkopfes und die Optimierung der Prozessparameter sind entscheidend für die weitere Verbesserung des Druckergebnisses. Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften zeigen, dass die mit dem AddCompS™-Druckkopf faserverstärkt hergestellten Bauteile über siebenmal steifer sind als 3D-gedruckte Strukturen aus reinem thermoplastischem Kunststoff.

Um den Anwendungsbereich zu vergrößern, werden zukünftig neuartige Druckmaterialien verarbeitet.



AddCompS™-Druckkopf  
AddCompS™ printing head

Makroskopische Darstellung eines gedruckten, endlosfaserverstärkten Bauteils  
Macroscopic representation of an endless fibre-reinforced, 3D-printed component



Autoren:  
Dr.-Ing. Björn Timo Kletz  
Dipl.-Ing. Steffen Kalow  
Maik Titze, M.Sc.





Versteifte Faserverbundstruktur mit integriertem SHM (Structural Health Monitoring)-Sensornetzwerk und reversiblen, künstlichem Schaden

Stiffened composite structure with integrated SHM (Structural Health Monitoring) sensor network and reversible artificial damage



## System

### System

Leicht und dynamisch – adaptive Blattfedern für den Schienenverkehr von morgen \_\_\_\_\_ 58  
*Lightweight and dynamic – adaptive leaf springs for the railway transport of tomorrow*

Adaptiver Spoiler – Beulen gegen den Luftwiderstand an laminaren Flügeln \_\_\_\_\_ 60  
*Adaptive spoiler – bumps for drag reduction on laminar wings*

Lärmreduzierte Smart Linings mit leichter und kostengünstiger Hardware \_\_\_\_\_ 62  
*Noise-reduced smart linings with light and cost-efficient hardware*

Funktioniert bei jedem Wetter: Strukturüberwachung in der Luftfahrt \_\_\_\_\_ 64  
*Works in any weather: Structural Health Monitoring in aeronautics*



# Leicht und dynamisch – adaptive Blattfedern für den Schienenverkehr von morgen

Lightweight and dynamic – adaptive leaf springs for the railway transport of tomorrow

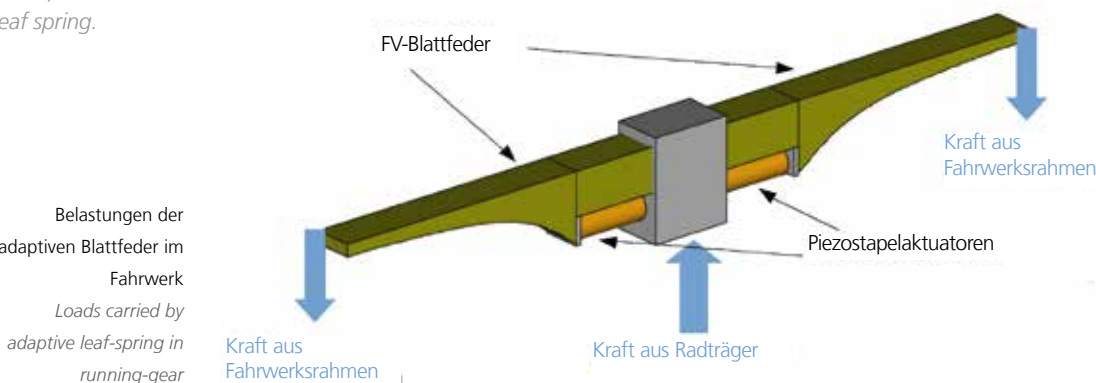
Der Schienenverkehr der Zukunft bedarf aufgrund der hohen Verkehrsdichte hoher Energieeffizienz und Sicherheit. Geringes Gewicht ist ein zentraler Punkt zur Erreichung hoher Energieeffizienz, daher werden im Rahmen der Forschung im Projekt Next Generation Train Einzelradlaufwerke untersucht, die im Vergleich zu herkömmlichen Drehgestellen mit Doppelachsen deutliche Gewichtsvorteile versprechen. Zur Erhöhung der Sicherheit und zur Verringerung des Verschleißes wird zusätzlich aktiv in das Fahrwerk eingegriffen, einerseits durch Einzelradantrieb der Räder des Laufwerks zur Beeinflussung der horizontalen Bewegung im Rad-Schiene-Kontakt und andererseits durch adaptive Blattfedern, die in die vertikale Bewegung eingreifen können und somit Verschleiß und Sicherheit direkt beeinflussen.

## Summary

Lightweight construction is of paramount importance for the railway transport of tomorrow due to energy efficiency. That is the reason why a single running gear is researched in the project Next Generation Train, as it promises to have less weight than conventional double running gears. The leaf springs of the running gear are designed as fibre-composite springs in order to also have low weight. To further increase safety and reduce wear, piezo-stack actuators are integrated to give dynamic authority to influence contact between wheel and rail. Tests with a downscaled model of the adaptive spring are used to feed data into a multi-body simulation of the complete train in order to identify an optimal control strategy for the adaptive leaf spring.

## Leicht durch Faserverbunde

Die Auslegung der Struktur der adaptiven Blattfeder wird in Faserverbund durchgeführt, um ein geringes Gewicht zu erreichen. Die Auslegung ist im Wesentlichen durch die Forderung einer definierten Steifigkeit gegeben, um die gewünschten Fahrwerkseigenschaften zu erreichen. Dennoch muss die Feder auch den gegebenen Festigkeitsrandbedingungen genügen. Der Entwurf der Federn geschieht in enger Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen anderer DLR-Institute, um sie in den Gesamtentwurf des Einzelradlaufwerks zu integrieren. Die Verwendung von Faserverbunden ermöglicht es, die Dickenverteilung und den Lagenaufbau der Blattfeder bezüglich der Festigkeit und der Steifigkeitsverteilung detailliert auszulegen und so ein möglichst geringes Gewicht bei gleichzeitiger Einhaltung der Anforderungen zu erreichen.



## Dynamisch durch integrierte Adaptronik

Die Integration von Piezostapelaktoren ermöglicht eine aktive dynamische Verformung der Blattfedern in Richtung ihrer Federwirkung. Diese aktive Verformung kann zur Beeinflussung des Rad-Schiene-Kontaktes benutzt werden. Das bedeutet, dass sowohl die Kräfte, die vom Rad auf die Schiene übertragen werden, als auch die Kräfte, die vom Rad in das Fahrgestell übertragen werden, beeinflusst werden können.

Ein Versuchsstand mit einem 1:5 herunterskalierten Modell der Feder wird benutzt, um dynamische Versuche mit der adaptiven Blattfeder durchzuführen. Dafür wird eine „dynamisch gleiche“ Blattfeder in dieser Größe ausgelegt, gefertigt und dynamisch untersucht. Die dabei ermittelten Versuchsdaten werden einerseits zur Modellvalidierung verwendet und andererseits in eine fahrdynamische Simulation des Gesamtzuges zurückgespiegelt, um die beste Regelstrategie für die adaptronische Feder zu finden.

Autor:  
Dipl.-Ing. Ralf Keimer



Verformungen des herunterskalierten Modells unter simulierten Lasten  
Deformations of the down-scaled model under simulated loads



# Adaptiver Spoiler – Beulen gegen den Luftwiderstand an laminaren Flügeln

Adaptive spoiler – bumps for drag reduction on laminar wings

Die Laminarhaltung der Grenzschicht an Tragflügeln der Zukunft hat unbestritten das größte Potenzial zur Reduzierung des Luftwiderstands und damit zu Kraftstoffeinsparungen. Laminare Flügel bedingen allerdings auch eine Druckverteilung mit relativ weit hinten liegendem Verdichtungsstoß, der aufgrund der geringen Pfeilung zu einem vergleichsweise schnell anwachsenden Wellenwiderstand bei „Off-design“-Bedingungen führt. Durch die strukturell günstige Lage im Bereich der Spoiler kann hier der adaptive Spoiler dazu beitragen, den Wellenwiderstand zu reduzieren. Erreicht wird dies durch die Ausbildung und genaue Positionierung einer „Beule“ in der Oberfläche des Spoilersegments.

## Summary

Laminarity is the uncontested technology for significant drag reduction for future wings. However, due to their characteristic pressure distribution they are sensitive to operation in off-design conditions and can suffer from strong compression shocks. Since the shock position is more rearward compared to turbulent wings a shock-control bump spoiler (SCBS) can be used. Such an SCBS can reduce wave drag in off-design and delay buffeting. Here, the adaptability of the bumps forming on the upper surface of the profile is of major importance. Incorrectly placed bumps can jeopardise the objective of drag reduction and the delay of flow separation. The realisation of a structural concept for a shock control bump spoiler is presently investigated at the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems. The challenge here is the enhancement of the spoiler functionality for shock control without increasing the complexity of this moveable. Here, 3D printed compliant mechanisms could play a role.

Führung des Spoilers und zweiter Aktuator für die Funktion als adaptiver Spoiler  
Guiding and second actuator of the adaptive spoiler concept



## Schwächung des Verdichtungsstoßes

Wird die Anströmgeschwindigkeit oder der Anstellwinkel eines umströmten Profils erhöht, kommt es bei transsonischer Strömung auf der Profiloberseite zu Bereichen, in denen örtlich Überschallgeschwindigkeit erreicht wird. Bei modernen, turbulenten Profilen wird dieser Bereich in der Regel durch einen (schwachen) Verdichtungsstoß abgeschlossen. Wird die Anströmgeschwindigkeit oder der Anstellwinkel weiter erhöht, nimmt die Stärke des Verdichtungsstoßes weiter zu und es kommt letztendlich zur Ablösung der Strömung und zum zeitweisen Einbruch des Auftriebs, dem sog. „Buffeting“. Bei modernen laminaren Profilen mit geringer Pfeilung wird im Vergleich dazu die Strömung auf der Oberseite über eine wesentlich längere Distanz kontinuierlich beschleunigt. Der Verdichtungsstoß liegt deutlich weiter hinten und ist auch wesentlich stärker ausgeprägt. Ebenso bewirkt ein Betrieb im „Off-design“ eine signifikante Zunahme des Wellenwiderstands. Durch die Ausbildung einer Beule im Bereich des Verdichtungsstoßes kann es gelingen, einen einzelnen starken Stoß in mehrere schwächere Verdichtungsstöße aufzufächern. In der Gesamtbilanz ergibt sich dadurch eine Verringerung des Wellenwiderstands.

## Der Schlüssel: Anpassungsfähigkeit

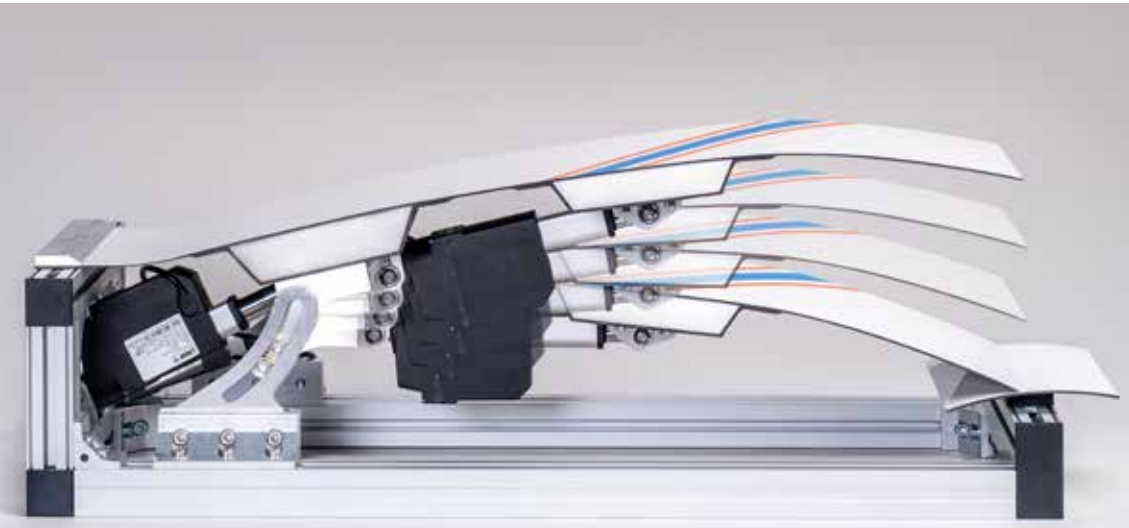
Für die Funktion der Beule ist allerdings die Größe und die genaue Positionierung unter dem Stoß entscheidend: Liegt die Beule zu weit vorn oder zu weit dahinter entsteht ein weiterer Stoß oder wird der Verdichtungsstoß verstärkt und der Widerstand nimmt zu. Das Strukturkonzept zur Ausbildung der Beule muss demnach einstellbar – also adaptiv sein!

Zusammen mit Airbus wird an einem Konzept gearbeitet, welches genau diese Eigenschaft aufweist und die Anforderungen an eine Luftfahrtstruktur erfüllt. Herausforderung ist dabei die Erweiterung des Spoilers um die Funktion zur Kontrolle des Verdichtungsstoßes ohne dabei die Komplexität des Bauteils signifikant durch z. B. die Einführung weiterer Motoren und Systeme zu erhöhen. Es wird dazu eine Vorverformung der Struktur berechnet, die später die Ausbildung der Beule ermöglicht. Eine weitere Rolle spielen nachgiebige Mechanismen, mit deren Hilfe der Einsatz zusätzlicher Aktuatoren vermieden werden soll.

Autor:  
Dr.-Ing. Markus Kintscher



Adaptiver Spoiler mit flexiblem Übergang  
Adaptive spoiler with flexible junction





# Lärmreduzierte Smart Linings mit leichter und kostengünstiger Hardware

Noise-reduced smart linings with light and cost-efficient hardware

Smarte Strukturen erfüllen Aufgaben der aktiven Vibrations- und Schalldämpfung mit Hilfe von Aktuatoren, Sensoren und Signalverarbeitung. Die Erforschung smarter Strukturen erfolgt im Labor unter Verwendung von hochwertiger Laborhardware. Den Weg in die Praxis können solche Systeme aber nur finden, wenn die teure und schwere Laborhardware durch kostengünstige und leichte Hardware ersetzt wird. Dabei müssen das höhere Eigenrauschen, die geringere Rechenleistung und andere Randbedingungen von Low-Cost-Systemen berücksichtigt werden. In Kooperation mit der Firma DIEHL Aviation hat das DLR ein lärmreduziertes Smart Lining entwickelt und erprobt, welches mit Low-Cost-Hardware ausgestattet ist. Das System erzielt eine vergleichbare Leistung wie ein teures und schweres Laborhardware-System. Es wurden Schallpegelreduktionen von bis zu 20 Dezibel bei einer Massenzunahme von nur zwei Prozent erreicht.

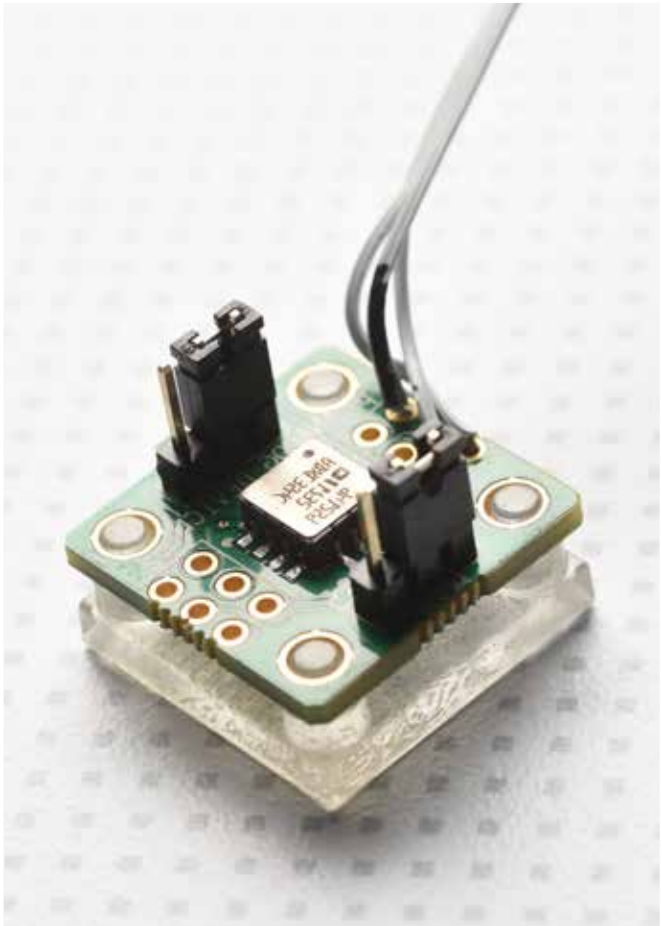
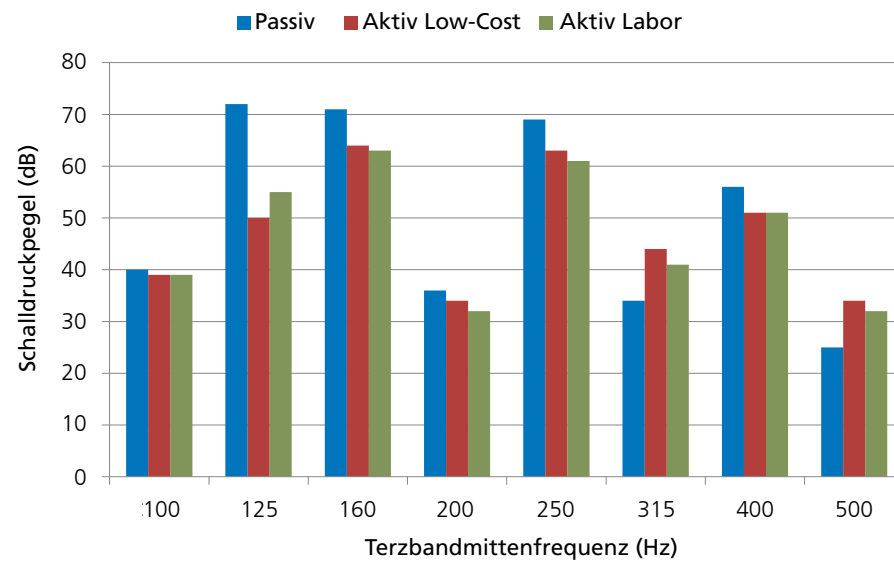
## Summary

Research on smart structures and systems starts on a laboratory scale by using low-noise sensors and high-performance rapid control prototyping systems. The replacement of such high priced and bulky laboratory hardware is one important precondition for the commercialisation of smart structures. The increased internal noise, the reduced computational performance and other restrictions of low-cost hardware must be taken into account during the design of a smart system. Experimental results on the noise reduction of a smart lining with low-cost hardware show that a replacement of laboratory hardware will not lead to a loss of performance. The smart lining achieves interior sound pressure level reductions of up to 20 decibel with a mass increase of only 2 per cent. Even a mass-neutral implementation seems possible, if conventional loudspeaker-driven passenger announcements are realised with smart linings.

## Effiziente Algorithmen für schlanke Systeme

Um den Sprung aus dem Labor in die Anwendung zu schaffen, müssen aktive Systeme kostengünstig, klein und leicht werden. Am Beispiel eines Seitenwandpaneels aus der Airbus-A350-Reihe konnte das DLR Schallpegelreduktionen des aktiven Low-Cost-Systems von bis zu 20 Dezibel bei einzelnen Tönen nachweisen. Dies entspricht einer spezifischen Reduktion von bis zu 100 Dezibel/Kilogramm. Ein mit Laborhardware ausgestattetes Smart Lining erreicht vergleichbare absolute Pegelreduktionen, dies jedoch mit viel Masse und hohen Kosten.

Aufgrund der geringeren Rechenleistung der Low-Cost-Hardware müssen besonders effiziente Algorithmen zum Einsatz kommen, welche einen stabilen Echtzeitbetrieb erlauben. Die hohe Effizienz des implementierten Algorithmus erlaubt eine Integration von Zusatzfunktionen, wie das Abspielen von Passagierdurchsagen (Passenger Announcements – PA).



## Weniger Masse durch Funktionsintegration

Durch die Integration zusätzlicher Funktionalitäten in das Smart Lining wird eine Masseneinsparung für das Flugzeug möglich. Beispielsweise dann, wenn die klassischen PA-Lautsprechersysteme, welche im gesamten Flugzeug oberhalb der Sitzreihen verbaut sind, durch Smart Linings ersetzt werden. In einem solchen Fall wäre eine gewichtsneutrale Umsetzung von Smart Linings realistisch.

Erste Tests in der Kabine des DLR-Forschungsflugzeugs Dornier Do728 zeigen, dass Smart Linings unabhängig voneinander arbeiten und den mittleren Schalldruckpegel im Bereich der zugehörigen Sitzreihen stark reduzieren können. Pro Lining umfasst der untersuchte Bereich etwa zwei Sitzreihen von Fenster bis zum Gang (also in der Regel circa sechs Sitze).

Ein wichtiger nächster Schritt auf dem Weg zur Anwendung ist der Flugversuch in einem propellergetriebenen Flugzeug.

Lining mit appliziertem Low-Cost-Sensor  
Lining with applied low-cost sensor

Autoren:  
Dr.-Ing. Malte Misol  
Dr.-Ing. Stephan Algemissen



Diagramm: Mittlerer Schalldruckpegel vor dem Lining für das Serienbauteil (Passiv), für das aktive Lining mit Low-Cost-Hardware (Aktiv Low-Cost) und für das aktive Lining mit Laborhardware  
Chart: Mean sound pressure level in front of the lining for the serial production part (passive), for the active lining with low-cost hardware (active low-cost) and for the active lining with laboratory hardware



# Funktioniert bei jedem Wetter: Strukturüberwachung in der Luftfahrt

*Works in any weather: Structural Health Monitoring in aeronautics*

**Faserverbundwerkstoffe erfordern im Schadensfall, wie bei unfallbedingten Schlagschäden, aufwändige zerstörungsfreie Prüfungen. Als effiziente Alternative bietet sich zukünftig die kontinuierliche Strukturüberwachung, auch Structural Health Monitoring (SHM) genannt, an. Eine der größten Herausforderungen für die Anwendung dieser Technologie ist das breite Spektrum an Umwelteinflüssen, denen ein Flugzeug ausgesetzt ist. Zahlreiche SHM-Verfahren benutzen einen datenfokussierten Ansatz, der auf einem Referenzdatensatz basiert. Änderungen in den Umgebungsbedingungen resultieren in Unsicherheiten hinsichtlich der Schadenserkenkung. Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich daher auf die Schadenserkenkung bei wechselnden Umweltbedingungen mittels Mustererkennung mit dem Ziel, die SHM-Technologien einen Schritt weiter in Richtung der praktischen Anwendung zu bringen.**

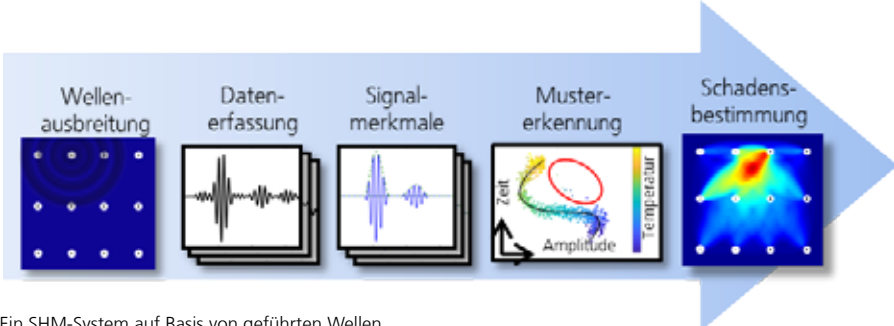
## Summary

*Structural Health Monitoring (SHM) represents a cost and time effective alternative to traditional non-destructive techniques. One of the main challenges for the application of the technique resides in the broad spectrum of environmental conditions of an aircraft. The project focuses on the selection of damage sensitive features and proposes a pattern recognition approach to identify damage in realistic environmental conditions. The topic brings SHM a step forward to field application, complementing the digital twin concept.*

## Datenerfassung: die Grundlage für Mustererkennung

Da Mustererkennungsverfahren von Messwerten lernen, steht die Qualität dieser Daten im Vordergrund. Die zu testenden Umweltbedingungen wurden in Kooperation mit Airbus definiert. Die Temperatur- und Feuchtigkeitsbereiche schließen sowohl Flugbedingungen als auch extreme Bedingungen am Boden während der gesamten Lebenszeit des Flugzeugs mit ein. Die Bedingungen berücksichtigen einen Temperaturbereich von -42 bis 85 Grad Celcius und eine Feuchteaufnahme bis zur Sättigung des Materials unter Hot-/Wet-Bedingungen.

Bei den experimentellen Untersuchungen an einer repräsentativen versteiften Faserverbundstruktur in einer Klimakammer werden akustische Daten mit einem integrierten Sensornetzwerk bei definierten Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen erfasst. Dazu wurde eine leistungsstarke Datenerfassungsplattform entwickelt, die die Messung mit der Steuerung der Klimakammer kombiniert.



Ein SHM-System auf Basis von geführten Wellen  
*An SHM system based on guided waves*

## Vom Schallsignal zur Entscheidungsfindung

Drei wesentliche Schritte sind erforderlich, um die mit dem SHM-Netzwerk erfassten Signale in Informationen über den Zustand der Struktur umzuwandeln: die Bestimmung von schadensrelevanten Signalmerkmalen, die Mustererkennung zur Datennormalisierung und die anschließende Schadensbestimmung. Die Bestimmung der Merkmale spielt eine wesentliche Rolle für die Realisierung der SHM-Technologie. Einerseits erlaubt dieser Schritt eine Datenkomprimierung, die die Anwendung eines datenfokussierten Ansatzes mit seinen großen Datenmengen erst ermöglicht. Andererseits bilden die gewonnenen Merkmale die Grundlage der Mustererkennung, die von den analysierten Daten lernt und die zugrunde liegenden Zusammenhänge identifiziert.

## Spezifisches Forschungsthema mit umfassenden Anwendungen

Schwerpunktmäßig werden die Arbeiten derzeit im Clean Sky 2-Projekt DEMETER vorangetrieben. Airbus trägt mit der Bereitstellung der Anlagen zur Signalerfassung und der Definition der experimentellen Randbedingungen zum Projekt bei. Obwohl der Fokus des Projekts auf Luftfahrtstrukturen liegt, können die meisten SHM-Anwendungsgebiete von der Forschungsarbeit profitieren. Sowohl die entwickelte Datenerfassungsplattform als auch die Ansätze zur Umgebungskompensation können in aktuellen und zukünftigen Projekten angewendet werden. Die Thematik ergänzt das Leitbild des digitalen Zwillings als Informationsquelle über den Flugzeugzustand während der gesamten Lebensdauer.

Autorin:  
Dipl.-Ing. Maria Moix-Bonet



Faserverbundstruktur mit integriertem SHM-Netzwerk und Datenerfassungsplattform  
*Composite structure with integrated SHM network and data acquisition platform*





Digitalisierung von Forschungsanlagen: Als Verwaltungsschale für Prozessinformationen wird ein fotorealistisches 3D-Modell der Anlage erzeugt

*Digitising research facilities: a photorealistic 3D model of a production line works as administration shell for process parameters*

**Industrialisierung**

*Industrialisation*

Erinnerungen an die Zukunft – virtuelles Abbild realer Aushärtungsprozesse\_\_\_\_\_68  
*A blast from the future – virtual image of real curing processes*

Smarte Blätter – clevere Fertigung \_\_\_\_\_70  
*Smart blades – smart production*

Mensch vs. Maschine – Inline-Qualitätssicherung von Faserlegeprozessen \_\_\_\_\_72  
*Human vs. machine – inline quality assurance for fibre placement processes*

(Ver-)Schlüsseltechnologie: Datensicherheit durch digitalen Zwilling \_\_\_\_\_74  
*A digital twin's key feature: unlocking hardware encryption*



# Erinnerungen an die Zukunft – virtuelles Abbild realer Aushärtungsprozesse

*A blast from the future – virtual image of real curing processes*

Die Verschmelzung der realen und der virtuellen Welt erweitert das Prozessverständnis sowie die Anzahl der möglichen Regelungsparameter. Somit steht eine wachsende Zahl von Optionen für einen direkten Eingriff in den laufenden Fertigungsablauf zur Verfügung, mit dem Ziel, den Prozess aus diversen Blickwinkeln unter Berücksichtigung essenzieller Kriterien zu betrachten, zu analysieren und abschließend zu optimieren! An einem solchen intelligenten und echtzeitfähigen System, das in der virtuellen Welt in der Lage ist, den realen Aushärtungsprozess zu optimieren, wird am DLR-Standort Stade in der Abteilung für Verbundprozesstechnologien geforscht.

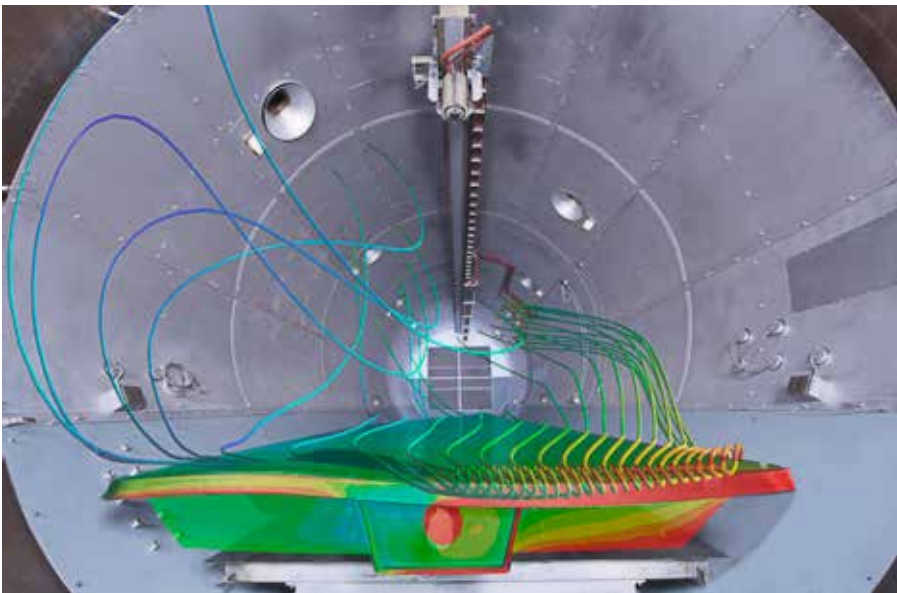
## Summary

*The merging of the real and virtual world expands the understanding of the process as well as the number of possible control parameters. In this way, several options for a direct intervention in the current production process are available. The aim is to view, analyse and ultimately optimise the process from a resource, cost and reproducibility perspective. An intelligent and real-time capable system that is able to optimise the real curing process in the virtual world has been researched at DLR's Stade location at the department for Composite Process Technology.*

## Entstehung der Erinnerungen

Der virtuelle Autoklav ist der digitale Zwilling des Forschungsautoklavs BALU®. Er kann in zwei Bereiche unterteilt werden: die virtuelle Anlage und das virtuelle Bauteil. Um die Aushärteprozesse innerhalb des Bauteils simulieren zu können, müssen zunächst die physikalischen Prozesse innerhalb des Autoklavs abgebildet werden. Hierfür wird eine 3D-Basisimulation verwendet, um die Strömungsverhältnisse darzustellen und hieraus die sich einstellenden Wärmeübergangszahlen am Bauteil zu berechnen.

Die Wärmeübergänge dienen im virtuellen Autoklav dazu, das Aushärteverhalten des gesamten Bauteils in Echtzeit mit Hilfe virtueller Sensoren vorherzusagen. Die Daten der Sensoren können in die Autoklavsteuerung einfließen und der Autoklavprozess aktiv geregelt werden. Die Simulation ermöglicht es, das Aushärteverhalten verschiedener Materialien bei unterschiedlichsten Temperaturverläufen abzubilden. In der Auswertungsebene können verschiedene Parameter und resultierende Bauteileigenschaften miteinander verglichen und ein für die Bauteilqualität optimierter Zyklus ermittelt werden. Neben Temperatur und Vernetzungsgrad wird es in Zukunft auch möglich sein, Dehnungen und Eigenspannungen darzustellen.



Verknüpfung der realen mit der virtuellen Welt: Strömungslinien und Temperaturprofil am CFK-Flügelwerkzeug im Autoklav  
*Linking the real to the virtual world: flow lines and temperature profile at the CFRP wing tool in the autoclave*

## Einsatzmöglichkeiten digitaler Zwillinge

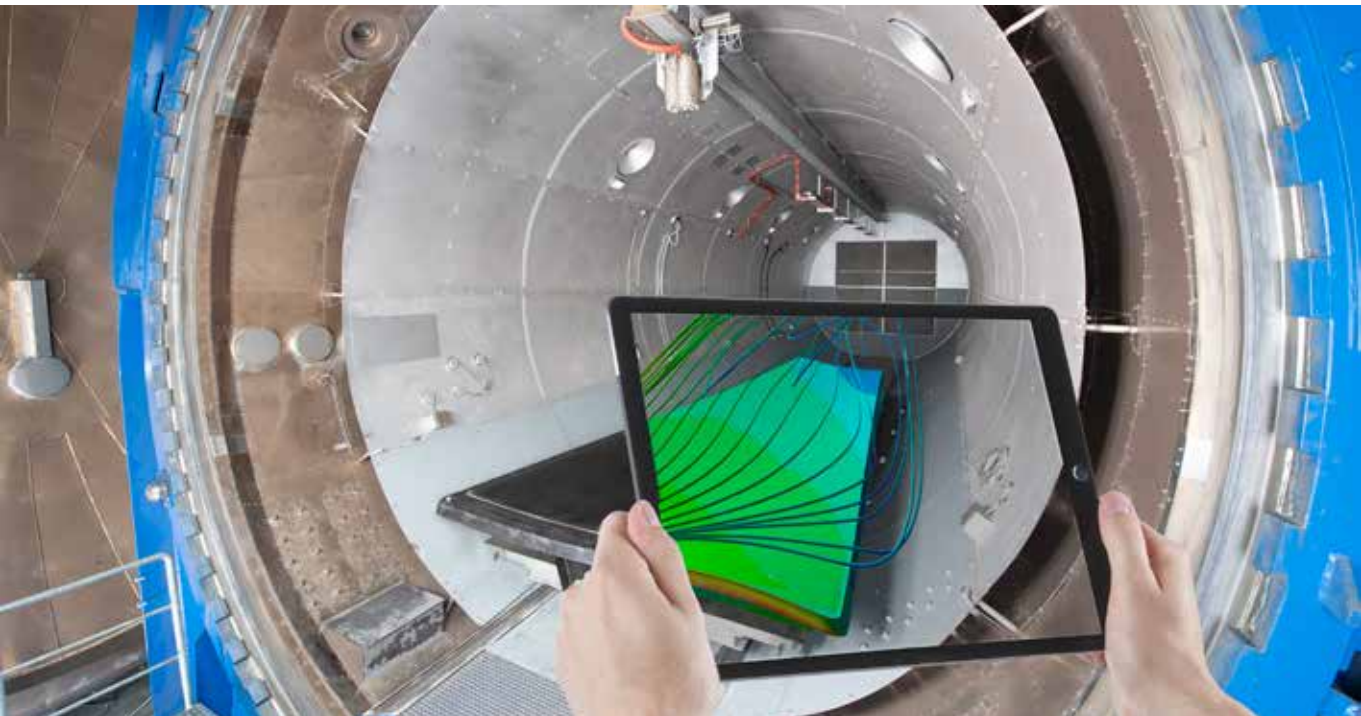
Die Stabilisierung der Prozesshaltezeiten mit Hilfe einer neuartigen Regelungsmethode bei Aushärtungsprozessen im Autoklav ist ein Projektergebnis. Sie zeigt, dass unnötige Haltezeiten, die in aktuellen Aushärtungsprozessen im Durchschnitt pro Haltephase bis zu 30 Prozent verlängert werden, fast restlos eliminiert werden können.

Geht man nun einen Schritt weiter und verknüpft die neuartige Regelungsmethode in der realen Welt mit dem virtuellen Autoklav – und somit dem digitalen Zwilling der Anlage und des Bauteils – können mit Hilfe der analysierten Informationen aus beiden Welten

- a. der Aushärtungsprozess der Bauteil(e) vor dem Beginn der Fertigung virtuell erprobt und optimiert werden
- b. Eingriffe in den laufenden Prozess erfolgen, die den Prozess im Hinblick auf Zeit und Kosten sowie das Bauteil im Hinblick auf Qualität optimieren

Auf diese Weise kann ein reproduzierbarer und ausschussfreier Aushärtungsprozess bei der autoklavgestützten Konsolidierung nach dem Prinzip „First Time Right“ gewährleistet werden.

Erprobung von Optimierungen der Aushärtezyklen in der echtzeitfähigen Simulation  
*Testing optimisations of curing cycles in real-time simulation*



Autoren:  
Anja Haschenburger B.Eng., M.A.  
Dipl.-Ing. Hakan Uçan





# Smarte Blätter – clevere Fertigung

Smart blades – smart production

**Um die Energieausbeute im Onshore-Bereich zu erhöhen, geht der Trend in der Windenergiebranche zu Windenergieanlagen mit immer größeren Rotorblattlängen. Dies birgt unter anderem Herausforderungen hinsichtlich der ertragbaren Lasten der Rotorblattstruktur, deren Gewicht möglichst gering ausfallen soll. Eine Möglichkeit, auftretende Lasten durch Windböen zu reduzieren, besteht durch den Einsatz einer geometrisch induzierten Biegetorsionskopplung, bei der sich das Rotorblatt ähnlich wie ein Baumblatt autark aus dem Wind herausdreht, um Schädigungen an der Struktur zu vermeiden. Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) hat vier Prototypen solch „smarter“ Blätter gefertigt**

## Summary

*In order to increase the energy yield in the onshore sector, the wind energy industry uses wind turbines with ever larger rotor blade lengths. Among other things, this is a great challenge for the rotor blade structure, the weight of which should be as low as possible to sustain the increased loads. One possibility to reduce occurring loads by gusts of wind is the use of a geometrically induced bend-twist coupling. Thus, the rotor blade turns out of the wind in an autonomous way to avoid damage, like a leaf. The Center for Lightweight-Production-Technology (ZLP) has produced four prototypes of such "smart" blades.*

## Kleine Blätter, smarter Kern

Die 20 Meter Länge bei einem Gewicht von 1,75 Tonnen der gefertigten Prototypen scheinen verglichen mit den in der Windkraftindustrie üblicherweise eingesetzten Rotorblättern klein. Fertigungstechnisch ist der Unterschied gering. Wie die meisten modernen Rotorblätter bestehen die „smarten“ Blätter aus glasfaserverstärktem Kunststoff und die Herstellung erfolgt in einer Halbschalen-Sandwichbauweise. Im Gegensatz zur industriellen Fertigung, in der man die wesentlichen Bestandteile der Halbschalen, wie Holmgurte, Flanscheinleger und Steg, in speziell dafür hergestellten Formwerkzeugen vorfertigt (Prefab-Bauteile), stand zur Fertigung lediglich ein zweiteiliges, elektrisch beheiztes Schalenwerkzeug zur Verfügung. Um die gestellten Qualitätsanforderungen zu erfüllen, sind die Anforderungen an das Fertigungskonzept der Prefab-Bauteile und die Qualitätssicherungsmaßnahmen hoch.

Das Reduzieren der Stegfertigung auf eine einfache Plattenfertigung und das spätere Ausfräsen der Kontur mit Hilfe von Schablonen ermöglichen nicht nur eine schnelle und kostengünstige Bauteilfertigung, sondern auch ein Anpassen der Stegkontur an die spätere Halbschalenoberflä-

che. Die Handablage der 120 Einzellagen des Flanscheinlegers im Schalenwerkzeug erfordert ein hohes Maß an Genauigkeit und Sorgfalt. Ein einfaches Hilfsmittel, ein Anschlagwinkel aus Spanplatten sowie der Zuschnitt der Lagen durch einen CNC-Cutter gleichen dabei die Vorteile eines zusätzlichen Formwerkzeugs aus. Spanplatten, Schablonen und clevere Fertigungs-ideen sind auch die Grundlage für die Positionierung der aus 34 Einzellagen bestehenden 18 Meter langen Holmgurte.

## Das Rotorblatt als Bausatz

Die Prefab-Fertigung von Rotorblättern gleicht einem Bausatz. Zunächst wird pro Halbschale der Flanscheinleger positioniert, gefolgt vom Außenlaminat, einem Puzzle aus vorgefertigtem Kernmaterial (Balsa und Schaum) und dem Holmgurt. Danach folgen das Innenlaminat und das Setzen des Stegs. Die Verklebung der beiden Blatthälften ist der kritischste Moment bei der Blattfertigung. Um den optimalen Klebspalt festzustellen, muss man eine Probeverklebung durchführen oder ausgereifte Sensorik verwenden. Hierfür eignet sich ein Ersatzstoff, der, wenn möglich, der Viskosität des Klebstoffs entspricht und sich auch leicht von den Formen lösen lässt. Kinderknete eignet sich hierfür hervorragend und die Reste können von Eltern gewinnbringend weiterverwendet werden.

## Qualitätssicherung: Holz, Knete und Sensorik

Durch den Einsatz von einfachen Hilfsmitteln (Holz, Knete, Schablonen) kann man bereits eine qualitätsgesicherte Fertigung sicherstellen, jedoch nicht ausreichend dokumentieren. Die während der Arbeiten eingesetzten Sensorsysteme – Thermografie, Ultraschallsensorik, optische und Laserpositionierungssysteme – stellen die Qualität der Fertigung zusätzlich sicher.



Klebstoffauftrag und Optimierung der Klebstoffnaht  
Application of the adhesive and subsequent optimi-  
sation of the adhesive bead



Ermittlung des exakten Klebspalts  
Determination of the exact adhesive gap



Entformung eines gefertigten Rotorblatts  
Demoulding of a manufactured rotor blade

Autor:  
Dipl.-Ing. Michael Kühn





# Mensch vs. Maschine – Inline-Qualitätssicherung von Faserlegeprozessen

Human vs. machine – Inline quality assurance for fibre placement processes

Die Qualitätssicherung für große Strukturen in der Luft- und Raumfahrt ist heutzutage mit enormem Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Dieser meist manuelle Inspektionsschritt ist zudem sehr fehleranfällig und stark abhängig von der Erfahrung und Verfassung des Prüfers. Diese Nachteile werden durch einen automatisierten und inline arbeitenden Prozess zur Qualitätssicherung (QS) eliminiert. Zu diesem Zweck wird eine Auswertelogik für bildgebende Eingangsdaten zur schnellen Detektion, Kategorisierung und Vermessung von Faserlegefehlern erforscht. Eine Reaktion des Systems auf fehlerhafte Ablegebereiche ist somit direkt im Faserlegeprozess, abhängig von Art und Größe eines Fehlers, möglich. Die gewonnenen Daten können darüber hinaus zur Unterstützung eines Inspektors und der umfassenden Dokumentation des Fertigungsprozesses genutzt werden.

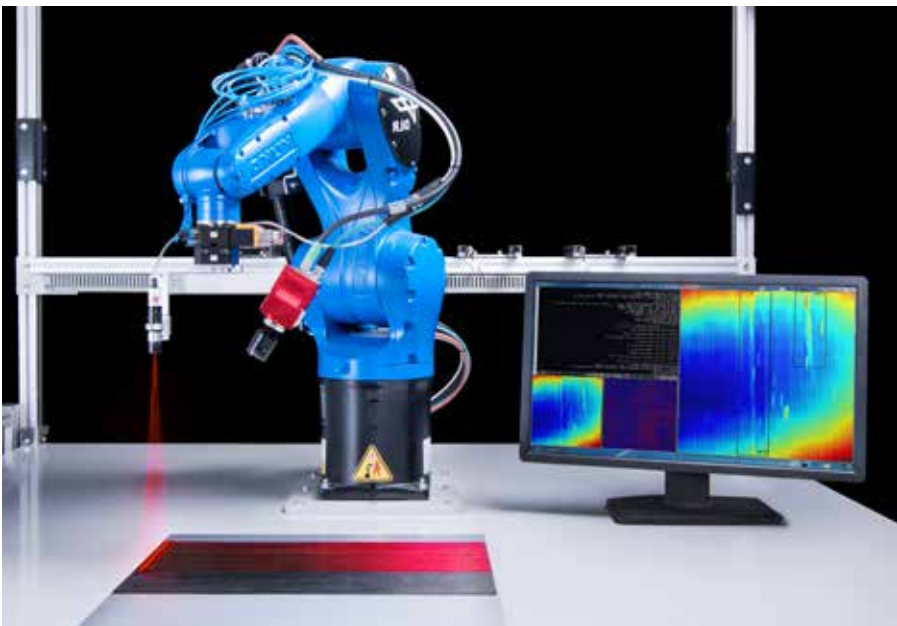
## Summary

Inline quality assurance methods are essential to improve part quality and reduce production time. Our image-based inline quality assurance system provides the possibility to detect defects, categorise them by type and determine position and size of the defects. The output information can be used for part documentation, inspection assistance or in future applications for an inline manipulation of the systems behaviour. The flexible algorithm design is able to work for various materials and most quality inspection scenarios with a need to analyse and evaluate image-based sensor data for inspection purposes. The parallel pre-analysis step is able to handle fast production velocities, e.g. up to 1 metre per second in AFP processes. The generation of knowledge about an optimal sensor and algorithm design is part of our ongoing research.

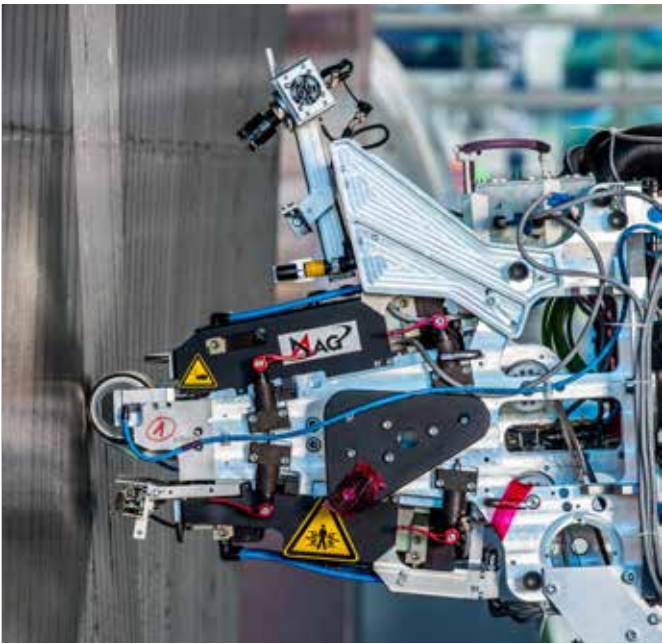
## Inline-QS für Faserlegeprozesse

Moderne Faserlegetechnologien ermöglichen das schnelle Aufbringen von Fasermaterial auf eine Form. Um den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt gerecht zu werden, ist eine Inspektion jeder einzelnen Ply unabdingbar. Dieser Schritt benötigt bis zu 68 Prozent der gesamten Produktionszeit und bietet somit enorme Einsparpotenziale. Darüber hinaus können die aktuellen Anforderungen an die Qualität eines Bauteils nur eingeschränkt durch einen manuellen Inspektionsschritt überwacht werden.

Abhilfe schafft hier ein inline arbeitendes bildgebendes QS-System zur Detektion, Kategorisierung und Vermessung von auftretenden Faserlegefehlern. In einem ersten Schritt wird hierbei die Bewertung der Faserablage hinsichtlich potenzieller Fehlerbereiche durchgeführt.



Prüfstand zur automatisierten Messdatenaufzeichnung mittels Inline-QS-System  
Test bay for automated data acquisition using the inline QA system



Faserlegekopf mit montiertem Laserlichtschnittsensor zur automatisierten Inspektion des abgelegten Fasermaterials  
AFP head with mounted laser light section sensor for automated fibre layup inspection

Um auch Faserlegeprozesse mit einer Geschwindigkeit von bis zu einem Meter pro Sekunde abdecken zu können, wird diese Berechnung parallelisiert auf einer kostengünstigen Grafikkarte durchgeführt. Potenzielle Fehlerbereiche werden in einem zweiten Schritt nach ihrem Fehlertyp kategorisiert. Zur Bereitstellung einer sehr robusten und hochflexiblen Auswertestruktur wird hierzu ein maschinelles Lernverfahren in Kombination mit einer Zusammenstellung verschiedener Bildbeschreibungsalgorithmen genutzt. Hierdurch ist es möglich, auch komplexe optische Fehlerbilder korrekt einzuordnen und eine robuste Funktionsweise zu realisieren. Die Analyse optimaler System- und Algorithmen Designs für unterschiedliche Materialien ist hierbei Teil unserer andauernden Forschungsaktivitäten.

## Erweiterte Möglichkeiten mit derselben Logik

Die Struktur der Auswertekette ermöglicht einen flexiblen Einsatz für unterschiedliche Anwendungsfälle. Hierbei können unterschiedliche bildgebende Sensoren einzeln oder in Kombination mit einem oder mehreren Bildbeschreibungsalgorithmen genutzt werden. Durch diese modulare Struktur ist das Auswertesystem nicht auf den Faserlegeprozess beschränkt, sondern kann in allen Bereichen der Qualitätssicherung eingesetzt werden, in denen bildbasierte Informationen analysiert und hinsichtlich auftretender Fehler bewertet werden müssen.

Einrichtung des Laserlichtschnittsensors zur automatisierten Qualitätssicherung  
Manual setup of the laser light section sensor for automated quality assurance



Autoren:  
Sebastian Meister, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Christian Krombholz





# (Ver-)Schlüsseltechnologie: Datensicherheit durch digitalen Zwilling

*A digital twin's key feature: unlocking hardware encryption*

## Summary

*Sharing real-production data through the Internet always goes along with the need for cybersecurity. DLR's approach on securing data from the research RTM production line "Evo" is encryption by hardware.. The shared data is only numbers in a spreadsheet without any context. Even if the data was stolen, the hacker would not be able to assign the values to a process step. Furthermore, when sharing uncalibrated values, the given temperatures, forces and pressures simply might be wrong and thus useless. Only the production line itself and its digital twin are capable of unlocking the encryption of the data by assigning values to the right process steps and machines and apply calibration factors to the raw values in order to show the right parameters.*

**Mit der Forschungsplattform Evo steht am ZLP Stade eine voll automatisierte Produktionslinie für endkonturnahe CFK-Bauteile im RTM (Resin Transfer Moulding)-Verfahren. Als Pilotanlage kann sie sowohl die Rolle eines fiktiven Zulieferers als auch einer hauseigenen Produktion einnehmen. Lösungen bezüglich End-to-End-Kommunikation, Fernüberwachung und Cybersecurity können direkt an vorhandener Hardware getestet werden, ohne einen realen Produktionsbetrieb zu stören.**

## Digitaler Zwilling ist der Schlüssel

Produktionsdaten von Flugzeugbauteilen müssen ebenso wie Produktdaten über das gesamte Flugzeubleben verfügbar und rückverfolgbar sein. Aber lassen sich Fertigungsprozesse nach 20 oder 30 Jahren wirklich noch anhand von Dokumentationen in Papierform rekapitulieren?

Der digitale Zwilling der Anlage ist ein virtuelles Abbild der Realität, bestehend aus einem 3D-Modell und zugeordneten Daten, dem sog. digitalen Schatten. Er kann genutzt werden, um zusammenhanglose Maschinendaten wie Druck- und Temperaturverläufe wieder in einen sinnvollen Kontext zu bringen. Dadurch bietet er gleichzeitig die Grundlage zur Datenverschlüsselung. Eine Tabelle, deren Spalten und Zeilen mit Zahlen gefüllt sind, ist nutzlos, wenn man nicht weiß, was sie bedeuten. Wie durch eine Dechiffriermaschine werden die Daten wieder in den richtigen Kontext gebracht, etwa Temperaturen einem Ofen zugeordnet oder ein Robotercode einer Offline-Programmierungsumgebung. Nur wenn der digitale Zwilling vorliegt, kann man die Informationen richtig interpretieren und gleichzeitig so darstellen, wie der Prozess tatsächlich stattgefunden hat.



Vision: (Fern-)Bedienung der Forschungsanlage über ihren digitalen Zwilling durch Virtual und Augmented Reality  
*Vision: (remote) control of the research platform by digital twin through virtual and augmented reality*

## Codierung durch Kalibrierung

Die Verschlüsselung lässt sich noch weiter treiben, indem nur unkalibrierte Rohdaten übermittelt werden. Gestohlene Daten wären damit nicht nur unbrauchbar, sondern aus Bauteilsicht falsch. Beispielsweise würde ein Pyrometer keine Temperatur in Grad Celsius ausgeben, sondern eine Spannung in Millivolt. Um daraus wieder eine nutzbare Information zu machen, muss nicht nur der genaue Typ des Sensors bekannt sein, sondern auch seine Position, Ausrichtung und andere anwendungsspezifische Größen, wie etwa der Emissionskoeffizient der Membran, auf die er gerichtet ist. Diese Daten werden in keiner Cloud zur Verfügung gestellt, sondern sind nur im digitalen Zwilling der Anlage hinterlegt.

Zur richtigen Übersetzung der Rohdaten in repräsentative Werte ist eine Kalibrierung nötig. Idealerweise wird diese anlagenunabhängig durchgeführt, z. B. durch produktintegrierte Sensorik. Dazu wird ein sensorbestücktes Kalibrierbauteil genutzt, das zudem verwendet werden kann, um denselben Prozess an einem anderen Standort oder zu einem späteren Zeitpunkt erneut zu validieren, nach demselben Prinzip wie ein Eichgewicht für Laborwaagen.

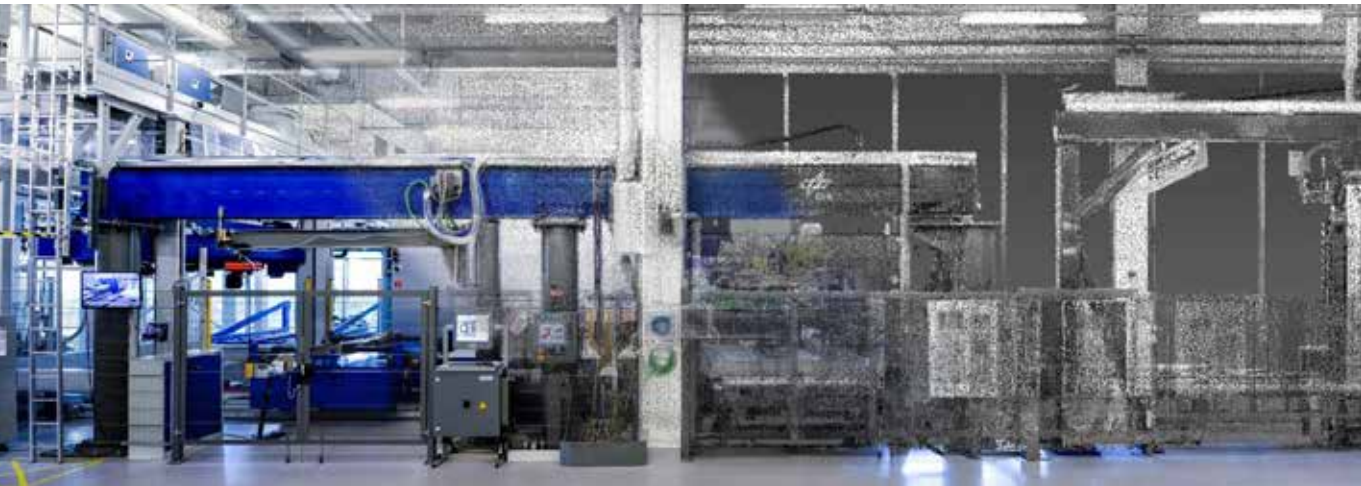


Streetview für drinnen: 3D-Scan der Evo-Produktionsstraße  
*Indoor streetview: 3D scan of Evo production line*

Autor:  
Dipl.-Ing. Sven Torstrick-v. d. Lieth



Digitale Transformation einer Forschungsanlage: physische (links in Farbe) und virtuelle (rechts in SW) Realität der Produktionslinie  
*Digital transition of a research platform: physical (left, coloured) and virtual (right, black-and-white) reality of a production line*





3D-gedruckter Entwurf eines dreifach-periodischen piezoelektrischen Aktuators

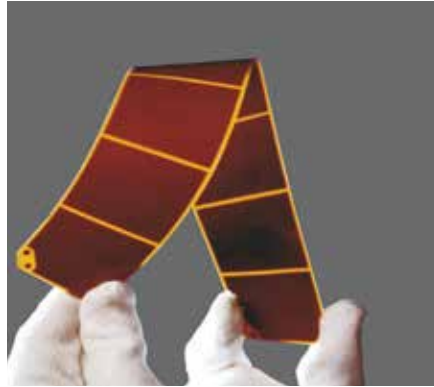
3D-printed design of a triply-periodic piezoelectric actuator

Das Institut im Detail

*The institute in detail*

Abteilungen	78
<i>Departments</i>	
Geschäftsfelder	84
<i>Business areas</i>	
Veröffentlichungen 2017–2018	90
<i>Publications 2016–2017</i>	
Neues Lehrbuch „Adaptronik“	92
<i>New course book "Adaptronik"</i>	
Patente 2017–2018	93
<i>Patents 2017–2018</i>	





# Abteilung Multifunktionswerkstoffe

Department Multifunctional Materials

## Summary

The department of Multifunctional Materials is doing research on the development, characterisation, and qualification of advanced fibre composite materials. New materials with superior properties are a prerequisite for technological innovations. Especially the integration of new functionalities is the key to further enhance the competitiveness and application range of composite materials. The department of Multifunctional Materials operates facilities for static and dynamic testing of materials and structures. In combination with a well-equipped thermoanalysis lab and long-standing experience in non-destructive testing with ultrasound, new material systems from coupon level and beyond can be evaluated.

## Vom Werkstoff zum intelligenten Materialsystem

Die Abteilung Multifunktionswerkstoffe fokussiert sich auf die Entwicklung, Charakterisierung und Qualifizierung von Faserverbundwerkstoffen mit überlegenen Eigenschaften und neuen Funktionalitäten. Beispielsweise werden durch die Konditionierung von Harzen mit nanoskaligen Partikeln mechanische Kennwerte, Brandeigenschaften und Prozessierbarkeit entscheidend verbessert. Darüber hinaus werden weitere Funktionswerkstoffe mit sensorischen und aktuatorischen Eigenschaften für die Integration in adaptive Verbundstrukturen entwickelt. Das Arbeitsgebiet erstreckt sich dabei von sehr grundsätzlichen Untersuchungen im Bereich der Carbon Nano Tubes (CNTs) bis zur Entwicklung serienreifer Piezokomposite in Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Gemeinsam mit internationalen Partnern und interdisziplinären Wissenschaftler-Teams fokussiert sich die Forschung auf folgende Bereiche:

- Faserverbundwerkstoffe & Nanokomposite
- Smart Materials
- Structural Health Monitoring (SHM)
- Werkstoffcharakterisierung

## Kompetenzen

Die Abteilung betreibt Anlagen zur statischen und dynamischen Prüfung von Werkstoffen und Strukturen. In Verbindung mit einer umfangreich ausgestatteten Thermoanalyse sowie den Kompetenzen in der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung können neue Werkstoffsysteme – vom Halbzeug bis zum Coupon und darüber hinaus – bewertet werden. Die Prüftechniken werden in Richtung Prozessüberwachung und Structural Health Monitoring (SHM) von Faserverbundstrukturen in Fertigung und Betrieb weiterentwickelt.

Leistungsprofil:

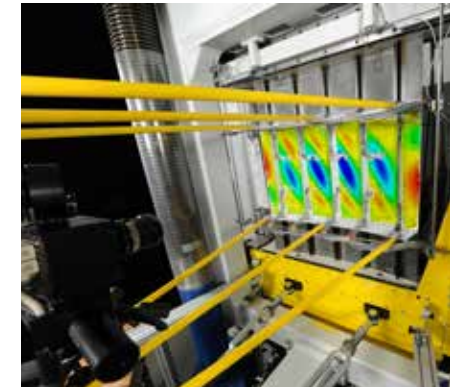
- Untersuchung neuer textiler Halbzeuge
- Verbesserung und Entwicklung neuer Injektionsharze
- Nanotechnologie in Faserverbundwerkstoffen (Nanocomposites)
- Naturfaserverstärkte Kunststoffe
- Smart Materials
- Piezokomposite
- Structural Health Monitoring (SHM)
- Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (NDT)
- Statische und dynamische Prüfung von Werkstoffen und Strukturen
- Thermoanalyse und Mikroskopie



Abteilungsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach

# Abteilung Strukturmechanik

Department Structural Mechanics



## Vom Phänomen über die Modellbildung zur Simulation

Die Abteilung Strukturmechanik fokussiert sich auf die Entwicklung neuer Simulationen und deren Software-Implementierung für die effiziente Analyse und Bewertung von Leichtbaustrukturen im Rahmen eines Concurrent/ Integrated-Engineering. Dabei werden Methoden zur Bewertung des gesamten Lebenszyklus von Strukturen der Luft- und Raumfahrt, der Verkehrstechnik und der Windenergie entwickelt. Gleichzeitig steht die experimentelle Validierung der neuen Methoden im besonderen Blickpunkt, für die innovative Versuchsmethodiken auf unterschiedlichen Ebenen der Testpyramide entwickelt und eingesetzt werden. Gemeinsam mit internationalen Partnern und in interdisziplinären Wissenschaftler-Teams fokussiert sich die Forschung auf folgende Bereiche:

- Effiziente Entwurfsmethoden
- Innovative Prüf- und Messverfahren auf Bauteilebene
- Virtuelle Strukturen und digitaler Zwilling für den ganzen Lebenszyklus

## Kompetenzen

Die Abteilung Strukturmechanik führt phänomenologische Untersuchungen des komplexen Strukturverhaltens unter multi-physikalischen Belastungen durch. Hierfür dienen experimentelle, analytische und numerische Verfahren. Neue Berechnungsmethoden werden zur genaueren und effizienteren Vorhersage sowie Bewertung des Material- und Strukturverhaltens entwickelt, als Software implementiert und in multi-disziplinäre Frameworks integriert. Die Validierung der Berechnungsmethoden erfolgt mittels kontinuierlich weiterentwickelter Prüfverfahren und neuer innovativer Prüfstände.

Leistungsprofil:

- Methoden für den Gesamtentwurf
- Strukturelle Stabilität
- Analyse der Schädigung und Schadenstoleranz von Material- bis Strukturebene
- Thermalanalyse und thermo-mechanisch gekoppelte Analyse
- As-built-Analyse mittels Prozesssimulation und Effects-of-Defects Bewertung
- Toleranz- und Uncertainty-Analyse auf multiplen Skalen
- Mess- und Versuchstechnik für phänomenologische, validierende und qualifizierende Versuche (z. B. Beulanlage, Spantbiegeversuch, dynamischer Fallprüfstand, THERMEX)

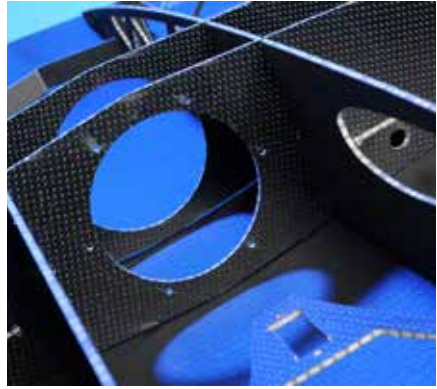
## Summary

Within the department of Structural Mechanics, the main focus is placed on research and development of reliable and efficient methods as well as software tools for analysing composite structures, which can be integrated into the overall CAE process. Therefore, fast numerical tools are available at an early development stage within a concurrent/integrated engineering concept. Special methods for simulation-based design, life cycle modelling and assessment are developed for primary composite structures for the aerospace, automotive, and wind energy industry. In this context, the experimental validation of new methods is of special interest as the department is developing and providing unique test facilities.



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Tobias Wille





# Abteilung Funktionsleichtbau

Department Composite Design

## Summary

*The department of Composite Design offers a closed development chain from the first sketch of composite structures, their sizing-up to a design allowing for efficient production. Hereby, adequate material selection including hybridisation and the consideration of fibre-composite specific aspects are addressed. Design concepts are optimised and assessed by using low and high-fidelity simulation tools, which also take into account probabilistically distributed material and manufacturing parameters. In the end, the detailed design is realised under consideration of tolerance management, quality assurance, and appropriate tool concepts. Particular emphasis in research is placed on the design of multifunctional structures, which, besides their required structural-mechanical properties, contain additional features like electric conductivity, acoustic noise absorption, information transmission, etc.*

## Von Anforderungen über Konzepte zu multifunktionalen Strukturen

In der Abteilung Funktionsleichtbau wird die geschlossene Konstruktionsprozesskette vom ersten Entwurf einer Struktur über die Auslegung bis hin zur werkstoff- und fertigungsgerechten Konstruktion von Prototypen realisiert. Im Entwurf werden faserverbundgerechte Bauweisen unter Einbeziehung einer geeigneten Werkstoffauswahl entwickelt, die auch Hybridwerkstoffe einschließt. Mittels numerischer Methoden werden in der Auslegung unterschiedliche Bauweisen optimiert und unter Einbeziehung der Probabilistik der Kennwerte des Materials und des Herstellungsprozesses bewertet. Unsere Forschung ist fokussiert auf:

- Faserverbundgerechtes Design von Bauteilen und Gesamtstrukturen
- Strukturkompetenz im Bereich Luft- und Raumfahrt sowie Verkehr und Windenergie
- Bauteil-, Werkzeug- und Anlagendesign für eine effiziente und kostengünstige CFK-Produktion
- Multifunktionale Strukturen in Faserverbundbauweise

## Kompetenzen

Im Zentrum der Prozesskette steht die Konstruktion, zu der die Realisierung eines montagegerechten Toleranzmanagements und eines geeigneten Werkzeugkonzepts zählt. Eine besondere wissenschaftliche Vertiefung erfolgt zu den Fragen der konstruktiven Realisierung von Multifunktionsstrukturen, die zusätzliche, für das Endprodukt geforderte Funktionen wie Informationsübertragung, Leitfähigkeit, Schallabsorption etc. integrieren.

### Leistungsprofil:

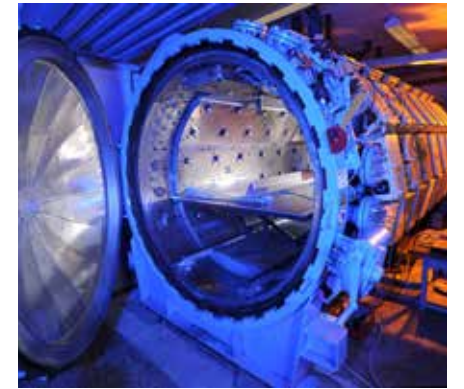
- Funktionsbauweisen, Konstruktion und Berechnung
- Design mit Funktionswerkstoffen
- Kinematische Mechanismen
- Probabilistik
- Formvariable Strukturen
- Entfaltbare Strukturen
- Bionik
- Hybride Konzepte



Abteilungsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

# Abteilung Faserverbundtechnologie

Department Composite Technology



## Fertigungskonzepte für unterschiedliche Produktionsrandbedingungen

Die Faserverbundtechnologie erforscht und entwickelt Fertigungsprozesse sowie Werkzeuge und Anlagenkonzepte für endlosfaserverstärkte Hochleistungsbauteile unter Berücksichtigung der kundenspezifischen Produktionsrandbedingungen. Die Bandbreite der Forschung erstreckt sich dabei von kostenoptimierter Massenproduktion für Automotive-Anwendungen bis zu gewichtsoptimierten Leichtbaustrukturen für die Luft- und Raumfahrt. Durch eine Integration von Zusatzfunktionen und eine Reduktion des Montageaufwands wird insbesondere kostenseitig die Attraktivität der Faserverbundkomponente erhöht.

## Kompetenzen

Aktuelle Forschungsaktivitäten sind insbesondere auf die Reduktion der Fertigungskosten durch Prozessautomatisierung, energiesparende Prozessanlagentechnik, verkürzte Prozesszeiten, prozessbegleitende Qualitätsüberwachungsmaßnahmen und die Einbindung nutzungsoptimierter Halbzeuge ausgerichtet. Darüber hinaus wird die Leistungssteigerung von Faserverbundkomponenten durch die prozesstechnische Einbindung innovativer Faser- und Matrixhalbzeuge und die fertigungstechnische Umsetzung strukturmechanisch optimierter Bauweisen untersucht.

### Leistungsprofil:

- Umsetzung optimierter Bauweisen in Demonstratoren und Testbauteilen
- Fertigungstechnische Erprobung innovativer Faser-, Matrix- und Binderhalbzeuge
- Entwicklung optimierter (z. B. energie-, kosten- und zeitsparender) Formwerkzeuge, Anlagen und Prozesse
- Entwicklung qualitätsgesicherter Fertigungsketten
- Fertigungskonzepte für hochintegrale Multifunktionsbauteile
- Abschätzung von Fertigungskosten und Erarbeitung von Kostenoptimierungsstrategien
- Prozessautomatisierung

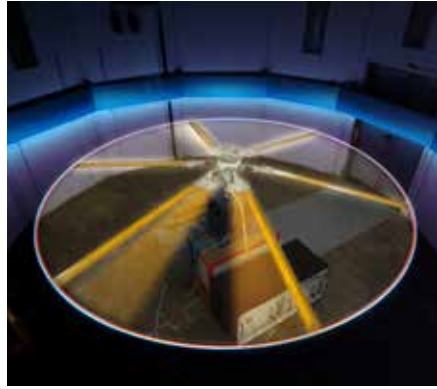
## Summary

*The department of Composite Technology undertakes research on the development and assessment of tailored composite manufacturing strategies. Research activities have their focus on reproducible preforming technologies, process-optimised tooling concepts, intelligent infusion strategies, process-adapted thermal management, and detailed cost assessment concepts. The increasing degree of structural integration without increasing production risks is one of the key enablers of future composite applications. To achieve this goal, our approach is to monitor all critical production parameters and provide methods to automatically compensate identified process deviations for all relevant production scenarios.*



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Markus Kleineberg





# Abteilung Adaptronik

Department Adaptronics

## Summary

Since 1989, the department of Adaptronics has been working as one of the first European research groups on solutions in the field of smart-structures technology. With its experience in adaptive systems comprising structural material, distributed actuators and sensors, control strategies, and power conditioning, electronics across all lines of business can be realised. Applications range from space systems to fixed-wing and rotary-wing aircraft, automotive, optical systems, machine tools, medical systems, and infrastructure. An adaptive system has the capability of responding to changing environmental and operational conditions (such as vibrations and shape change). Microprocessors analyse the signals of the sensors and use integrated control algorithms to command the actuators to apply localised strains/displacements/damping to alter the elasto-mechanical system response.



## Von der Struktur zum adaptiven System

Seit 1989 arbeitet die Abteilung Adaptronik als eine der ersten europäischen Forschungsgruppen an technologischen Lösungen auf dem Gebiet der Adaptronik. Dank jahrelanger Erfahrung können adaptronische Systeme, die Strukturwerkstoffe, verteilte Sensorik und Aktuatorik sowie optimierte Regelungs- und Leistungselektronik in sich vereinen, quer durch alle Branchen realisiert werden. Die Anwendungen reichen von Raumfahrtssystemen bis zu Starr- und Drehflüglern, von Verkehrssystemen bis zu optischen Systemen in Windenergieanlagen und von Werkzeugmaschinen bis zu Robotern. Ein adaptronisches System hat die Fähigkeit, auf veränderliche operationelle Bedingungen (wie z. B. Schwingungen oder Belastungsänderungen oder auch Vereisung) zu reagieren. Mikroprozessoren analysieren die Signale der Sensoren und verwenden integrierte Regelungsalgorithmen zur Ansteuerung der Aktuatoren, um so lokal Kräfte/Verformungen/Dämpfung zur Anpassung des elasto-mechanischen Strukturverhaltens einbringen zu können. Der 3D-Druck bietet beim Aufbau solch spezialisierter anpassbarer Strukturen ganz neue Möglichkeiten und wird für diese Anwendungen genutzt und weiterentwickelt. Adaptive Strukturen können auch zum Zweck der Enteisung und Eiserkennung ausgelegt werden.

## Kompetenzen

Die Abteilung bietet Kunden und Projektpartnern ihre Kompetenzen an, beginnend mit Beratung und Systemanalyse bis hin zur kompletten Auslegung adaptronischer Systeme.

- Experimentelle Methoden für strukturdynamische und vibroakustische Systemanalyse
- Experimentelle Verformungsanalyse für große Strukturen
- Entwicklung von Sensor- und Aktuatorssystemen
- Modellierung und Simulation komplexer adaptronischer Systeme
- Reglerentwicklung und -implementierung
- Systemintegration und Validierung
- Demonstration von adaptronischen Systemen und deren Komponenten

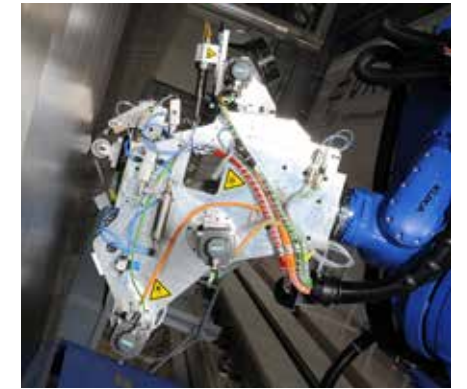
## Leistungsprofil:

- Aktive Vibrationsunterdrückung (z. B. bei Parallelrobotern, Impactschutz von Sensoren, Antennen)
- Aktive Lärmreduktion (z. B. bei Kfz-Windschutzscheiben, Flugzeug-Linings, CFK-Rümpfen)
- Aktive Gestaltkontrolle (z. B. für Hochauftriebssysteme, Rotorblätter)
- Autark agierende Systeme (z. B. Energy Harvesting, elektromechanische Netzwerke)
- 3D-Druck adaptiver Strukturen (z. B. Druck von druckbeaufschlagbaren Zellen, langfaser-verstärkter 3D-Thermoplast-Druck zur gezielten lokalen 3D-Versteifung von Strukturen)
- Enteisung/Eiserkennung (z. B. Enteisung durch Schwingungen)

Abteilungsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner  
Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider

# Abteilung Verbundprozesstechnologien

Department Composite Process Technology



## Summary

The department of Composite Process Technologies provides the scientific backbone of the Center for Lightweight Production Technology (ZLP) in Stade. By doing fundamental research work in the fields of advanced fibre placement, automated RTM processes, autoclave technology, and production technologies are developed and tested for application. By testing and simulation of processes in a full-scale dimension, effects can be explored, which otherwise could have shown up at a later utilisation of the technology. Hence, the complete process chain can be examined prior to industrial realisation.

## Für den nachhaltigen Gesamtprozess

Die im Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) beheimatete Abteilung besitzt die Möglichkeit, Projekte und Forschungsaufgaben unter Berücksichtigung der industriellen Anwendung in realistischen Szenarien und Maßstäben auszuführen. Während in der Faserverbundtechnologie Einzelprozesse weiterentwickelt und prozesstypische Effekte wie prozessinduzierte Bauteildeformationen auf Coupon- oder Einzelteilebene erforscht werden, untersucht die Abteilung Verbundprozesstechnologien das Zusammenspiel der Teilprozesse und Aspekte der Automatisierung im Industriemaßstab. Das Hauptziel dabei ist es, für ein Bauteil optimale Produktionsverfahren in Bezug auf Qualität, Kosten, Fertigungszeit und Ressourceneffizienz zu finden. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der Forschung, den Anlagenherstellern und den Endanwendern ist Voraussetzung für einen schnellen Transfer von Forschungsergebnissen in Serienanwendungen.

## Kompetenzen

Die Abteilung Verbundprozesstechnologien führt Forschungsarbeiten auf den Gebieten der Multikopf-Faserablage, der automatisierten RTM-Fertigung und qualitätsgesicherter Aushärtprozesse durch. Sie ist zudem für den Betrieb der folgenden drei Großanlagen des ZLP Stade verantwortlich:

- GroFi®: szenarioflexible Großanlage für kombiniertes Fibre Placement und Tapelegen. Bauteilgröße bis zu 18 Meter x 5,5 Meter Durchmesser; bis zu acht koordiniert arbeitende Legeplattformen für hohe Ablageraten
- EVo: voll automatisierte Produktionslinie für FVK-Großserienbauteile in Preforming/RTM-Technologie; Bauteilgrundriss bis zu 2 Meter x 2,5 Meter
- BALU®: Forschungsautoklav für qualitätsgesicherte und ressourceneffiziente Aushärtprozesse; Beschickungsmaße 20 Meter x 5,8 Meter; Temperaturen bis 420 °C

## Leistungsprofil:

- Prozessautomatisierung
- Prozessüberwachung und Fehlermanagement
- Entwicklung von multifunktionalen Endeffektoren und zugehöriger Peripherie
- Interaktion von Formwerkzeug, Prozessgut und Endeffektor
- Kombination von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Ablageprozessen
- Steuerung & Optimierung von Mehrkopf-Faserablageprozessen
- Multifunktions-Formwerkzeuge
- Prozessdaten-Management



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Jan Stüve



# Geschäftsfeld Rumpf

*Business area Fuselage*

## Summary

The business area "Fuselage" is dedicated to future fuselage concepts. Lightweight materials, e.g. CFRP and multi-material combinations are used and investigated to cover the main objectives: weight and cost reduction. At the same time, more robust stability, residual strength and impact tolerance requirements shall be met to cover the functionalities of cabin and systems. Improved design and analysis methods in conjunction with respective validation tests as well as commercially efficient production and assembly processes will directly be integrated into innovative and future-oriented fuselage architectures. For that, full-scale demonstration is a key enabler to cover large structural cut-outs, e.g. passenger and cargo doors, load-carrying cabin elements as well as bonded and/or welded joining technologies. From an industrial point of view, the focus of research activities lies on large structural components, stiffening elements and secondary structural components of the cabin to finally achieve a safer and lightweight aircraft with integrated functions.



Im Geschäftsfeld Rumpf werden Konzepte für den Flugzeugrumpf der Zukunft entwickelt, unter Verwendung von Leichtbauwerkstoffen wie CFK oder geeigneten Multimaterialkombinationen. Ziel ist eine Gewichts- und Kostenreduktion bei erhöhter Robustheit hinsichtlich Stabilität, Festigkeit, Restfestigkeit und Impacttoleranz sowie eine maximale Funktionsintegration unter Berücksichtigung der Anforderungen und Funktionen von Kabine und Systemen. Neue Werkstoffe und Werkstoffkombinationen, moderne Entwurfs- und Nachweisverfahren unter Verwendung geeigneter Validierungstests sowie wirtschaftliche Herstellungs- und Montageprozesse werden in innovativen funktionsintegrierten Bauweisen bis zu Demonstratoren im 1:1-Maßstab entwickelt, die auch große Ausschnitte für Passagier- und Frachtraumtüren, mittragende Kabinenelemente sowie geklebte oder geschweißte Verbindungen beinhalten. Als industrielle Anwendungsfälle stehen hierbei Großbauteile (z. B. Rumpfschalen), komplexe Versteifungselemente (z. B. Spante) und Sekundärstrukturen der Kabine im Fokus.



Geschäftsfeldleiter:  
Dr.-Ing. Janko Kreikemeier

# Geschäftsfeld Sicherheit

*Business area Security*

## Summary

The business area "Security" is assigned to all aircraft and their structural components that are not classified as classic large components – wings and fuselage – of modern airliners. This naturally applies to military aircraft, but also to the entire range of unmanned aerial vehicles (UAV), as well as special structural components of civil aircraft with special requirements (for example structures for electrically driven vehicles and vertical take-off capability or multifunctional structural aspects such as laminar wings, radomes, de-icing and structurally integrated antennas). Research in this business area is currently focused on cost-efficient manufacturing technologies, design and materials for future fighter aircraft and unmanned aerial vehicles, and ranges from structural design to prototype construction. Special electromagnetic requirements such as the embedding of antennas in the composite structure or low radar reflections require technologies, methods and materials that are developed exclusively in this business area.



Dem Geschäftsfeld Sicherheit sind sämtliche Luftfahrzeuge und deren Strukturkomponenten zugeordnet, die nicht als klassische Großkomponente – Flügel und Rumpf – moderner Verkehrsflugzeuge klassifiziert sind. Dies gilt naturgemäß für militärisches Luftfahrtgerät, aber auch für die gesamte Bandbreite unbemannter Luftfahrzeuge (UAV – Unmanned Aerial Vehicles), sowie für spezielle Strukturkomponenten ziviler Luftfahrzeuge, an die ganz besondere Anforderungen (wie beispielsweise durch elektrische Antriebe und Senkrechtstartfähigkeit oder auch durch multifunktionale Strukturaspekte wie Laminarflügel, Radome, Enteisierung und strukturintegrierte Antennen) gestellt werden. Die Forschungsarbeiten in diesem Geschäftsfeld zielen gegenwärtig auf kosteneffiziente Herstellungstechnologien, Bauweisen und Werkstoffe zukünftiger Kampfflugzeuge und unbemannter Luftfahrzeuge und reichen vom Strukturentwurf bis hin zum Prototypenbau. Besondere elektromagnetische Anforderungen, wie etwa die Einbettung von Antennen in die Verbundstruktur oder niedrige Radarreflexionen, erfordern Technologien, Methoden und Werkstoffe, die ausschließlich in diesem Geschäftsfeld entwickelt werden.



Geschäftsfeldleiter:  
Dipl.-Ing. Michael Hanke

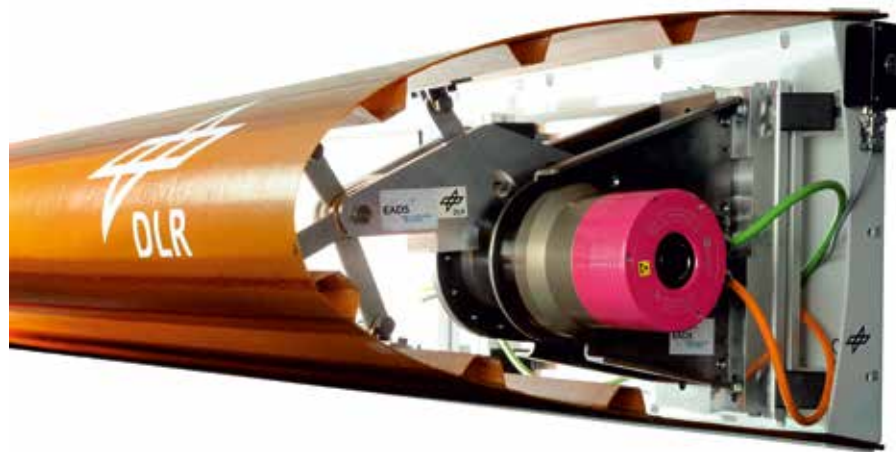


# Geschäftsfeld Flügel

Business area Wing

## Summary

The business area "Wing" at the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems includes a broad range of research topics for wing structures. It combines the key competences of the different departments within the institute with the aim to develop integrated design solutions and innovative concepts for future wings. Such innovations are intended to generate a net benefit in terms of cost, economic footprint or weight. Current research topics include virtual product development of the wing including validation strategy and the development and optimisation of classical wing components and moveables such as leading and trailing edge devices. New methods for the automated manufacture of fibre-reinforced wing components as well as "Multi-Functional Moveables" which, for example, allow for both flight control and gust load alleviation are being investigated. Another key research focus of this business area is the design and manufacture of structures that allow for more airflow laminarity and reduced fuel burn, either through natural laminar flow (NLF) or via hybrid laminar flow control (HLFC). This business area encompasses a large number of research projects on both the national and international scale.



Das Geschäftsfeld Flügel im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik umfaßt alle Forschungsthemen, die sich mit dem Faserverbundleichtbau von Flügelstrukturen befassen. Die Themenbreite reicht von Vorentwurfswerkzeugen für die schnelle Auslegung von Flügeln und Untersuchung von neuen Flugzeugkonfigurationen bis hin zu detaillierten Untersuchungen und Tests von einzelnen Komponenten der Flügelstruktur. Im Geschäftsfeld Flügel werden die Kernkompetenzen einzelner Abteilungen im Institut zusammengeführt um eine ganzheitliche Untersuchung und Bewertung von Strukturkomponenten durchführen zu können. Ziel ist einerseits die Weiterentwicklung und Optimierung von bestehenden Bauweisen von Strukturkomponenten für den Flügel, andererseits aber auch die Erforschung von neuen Technologien und die Integration von neuen Funktionen, so dass für den Einsatz ein Kostenvorteil entsteht. Aktuelle Forschungsthemen sind dabei z.B. die vollständige digitale Entwicklung von Entwurfs-, Entwicklungs- und Fertigungsprozessen für den Flügel, die Weiterentwicklung und Optimierung der klassischen Hochauftriebssysteme an der Vorder- und Hinterkante des Flügels sowie Landeklappen und Vorflügel als auch klassische Steuerflächen wie das Querruder. Hier insbesondere neue Methoden der automatisierten Fertigung von Faserverbundwerkstoffen und Integration von neuen Funktionalitäten wie z.B. Böenlastabminderung aber auch das Thema „Multi-Functional Moveables“. Schließlich wird das Thema Laminarität am Flügel (NLF und HLFC) in zahlreichen Projekten mit dem Ziel untersucht, den Widerstand im Reiseflug zu reduzieren.



Geschäftsfeldleiter:  
Dr.-Ing. Markus Kintscher

# Geschäftsfeld Raumfahrt

Business area Space Technologies

## Summary

The interdisciplinary business area "space technologies" represents a class of its own, which distinguishes itself from aeronautical and ground transport applications. The space research at the institute is strongly shaped by ESA and DLR research missions. Therefore, a large portion of our work focuses on spacecraft and landers for the exploration of the solar system. Notable examples are "Philae", which landed on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, and the space probe "MASCOT" about to land on the asteroid Ryugu. Tailored design concepts and new production processes are routinely developed to yield the structures required for satellites and interplanetary missions. The second major field of work is the development of ultralight deployable structures such as very large solar generators, solar sails, and large deployable antennas. In fact, the institute is a worldwide leader in the design of unique and innovative deployable structures. Thirdly, in the field of space transport, the institute is conducting research on a number of levels from hybrid connections to high-performance load-bearing structures for new vehicles. In the future, the space structures will be intelligent with qualities such as "sensitive," "reactive" and "healing". The ultimate goal is a set of structures that are aware of their state and react autonomously to external influences.



Raumfahrt ist ein herausforderndes interdisziplinäres Forschungsgebiet. Eine starke Orientierung an den Forschungsmissionen der ESA, den DLR-eigenen Missionen, den raumfahrtspezifischen Technologien und den ECSS-Standards als übergreifendem Regelwerk sind für das Geschäftsfeld Weltraum im Institut maßgeblich. Ein Hauptarbeitsgebiet ist die Entwicklung von Raumsonden und Landern für die Exploration des Sonnensystems, wie beispielsweise der Kometenlander „Philae“ der Rosetta-Mission und der im Dezember 2014 gestartete MASCOT-Asteroidenlander der Hayabusa2-Mission. Auch neuartige Designkonzepte und Fertigungstechnologien für die Strukturen von Kompaktsatelliten und Instrumentenstrukturen für Satelliten und interplanetare Missionen gehören zu diesem Feld. Ein weiteres Hauptarbeitsgebiet stellen die ultraleichten entfaltbaren Strukturen dar, zum Beispiel für zukünftige sehr große Solargeneratoren, Sonnensegel (solar sails) oder große, im Raum entfaltbare Antennen. Hierfür entwickelt das Institut weltweit einzigartige und äußerst innovative Entfaltungskonzepte. Im Bereich des Raumtransports erforscht das Institut hybride Verbindungselemente sowie hoch belastbare Strukturen für neuartige Startsysteme. Zukünftig sollen die Raumfahrtstrukturen des Instituts zudem smarter werden: „Sensieren“, „Reagieren“ und „Heilen“ sind Schlagworte zu diesem Ansatz. Das Ziel sind Strukturen, die sich selbst überwachen und weitgehend autonom auf äußere Einflüsse reagieren.



Geschäftsfeldleiter:  
Dipl.-Ing. Olaf Mierheim

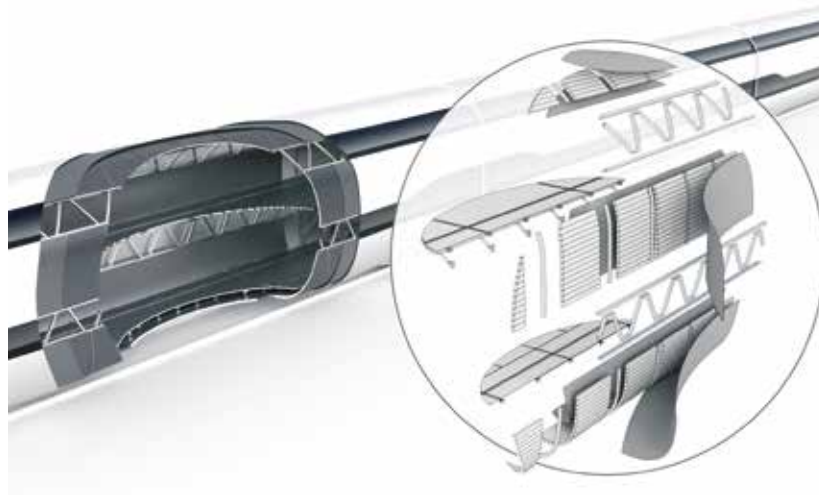


# Geschäftsfeld Verkehr

Business area Transport

## Summary

The business area "Transport" focuses on projects dealing with ground transport vehicles. A number of technical developments from aeronautical research such as lightweight and damage-tolerant structures can also be applied to the development of ground transport. However, many traffic-related research aspects are very specific so that the corresponding projects can be coordinated more efficiently within a distinct area of research. The Institute of Composite Structures and Adaptive Systems significantly contributes to the advances of road and rail vehicles by developing novel, highly modular structures and cost-efficient, automated production processes. For instance, in the DLR project "Next Generation Train – Backbone of Intermodal Transport", new analysis and simulation methods for the design of sustainable railcar structures were researched. Furthermore, multifunctional automotive structures are being developed and produced in the "Next Generation Car" project. The main challenge in this research area is achieving a mobility that balances economy, society, and ecology. Therefore, the mobility of people and goods has to be ensured, the environmental protection standards have to be maintained and safety has to be improved. Thus, multiple synergies are used and a strategic cooperation with partners from research and industry is implemented.



Aus dem Spannungsfeld zwischen Mobilitätsansprüchen und Mobilitätsauswirkungen ergeben sich für das Geschäftsfeld Verkehr zwei zentrale Herausforderungen: Sicherung der Mobilität bei gleichzeitiger Schonung von Umwelt und Ressourcen und Erhöhung der Sicherheit. Dabei nimmt der Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen im Hinblick auf die Elektromobilität eine Schlüsselrolle ein. Hierzu steht im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik das in Luft- und Raumfahrtanwendungen erworbene Expertenwissen bereit. Die Projekte des bodengebundenen Verkehrs, d. h. die Forschungsarbeiten mit der Ausrichtung auf Straßen-, Schienen- und Wasserfahrzeuge, sind dabei im Geschäftsfeld Verkehr zusammengefasst. In den grundfinanzierten Projekten „Next Generation Car“ (NGC) und „Next Generation Train – Backbone of Intermodal Transport“ (NGT BIT) werden beispielsweise multifunktionale Strukturen, zuverlässige Bauweisen sowie kostengünstige, automatisierte Fertigungsverfahren für Automobil- und Schienenfahrzeuganwendungen entwickelt. Das Geschäftsfeld zielt auf einen adäquaten Einsatz moderner Faserkunststoffverbundtechnologien in bodengebundenen Verkehrsträgern ab. In Kooperation mit Herstellern aus dem Automobil- und Schienenfahrzeugbereich befinden sich dazu Bauweisen sowie wirtschaftliche Strukturüberwachungs- und Produktionstechnologien für die industrielle Serienanwendung in der Entwicklung.



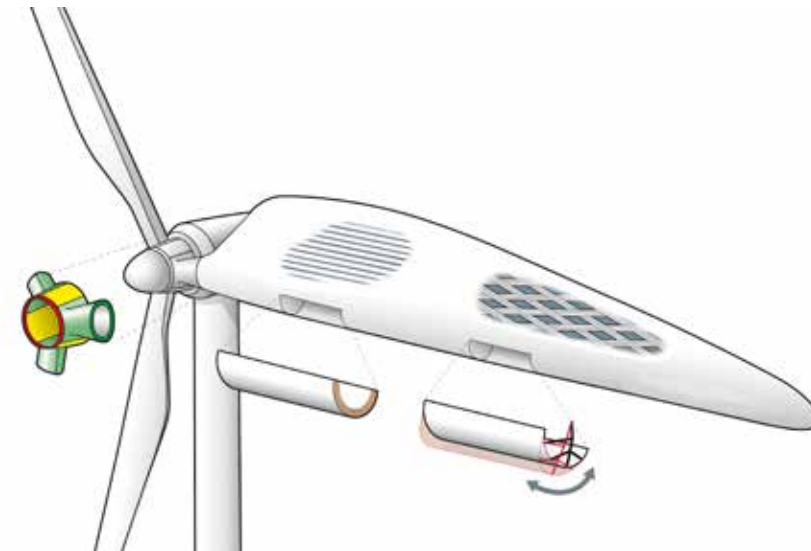
Geschäftsfeldleiterin:  
Imke Riese-Koerner, M.Sc.

# Geschäftsfeld Windenergie

Business area Wind Energy

## Summary

Wind energy is an alternative energy source with a high potential for the future. Through optimising the rotor blade structure as well as new methods of construction and production processes, both weight and costs can be reduced. At the Center for Lightweight Production Technology (ZLP) in Stade and in the laboratories in Braunschweig, research from coupon to industrial scale is possible. For reduction of operating costs and for better planning of maintenance intervals, research is done on systems for Structural Health Monitoring (SHM). In the future, the operating loads will be reduced by means of adaptive trailing edges and bending-twisting coupling. Through integration of additional functionalities in the material, rotor blades cannot only be manufactured in a cost-optimised way in the future, also service life and energy yield will be considerably enhanced. A further contribution to achieve this aim are developments towards quality-controlled production. The interdisciplinary cooperation with other DLR institutes enables efficient assessment and comparison of new types of construction.



Die Windenergie ist eine alternative Energiequelle mit hohem Zukunftspotenzial. Die immer größeren Anlagen mit immer längeren und schwereren Blättern stoßen an die Grenzen der Lagerbelastung in der Nabe, der Festigkeiten im Blatt sowie der zulässigen Blattdurchbiegung unter Belastung. Leichtbaustrukturen und technologische Ansätze aus der Luftfahrt sind für weitere Leistungssteigerungen von Windkraftanlagen nutzbar. Durch eine Optimierung der Rotorblattstruktur sowie durch neue Bauweisen, Auslegungsmethoden und Produktionsverfahren werden Gewicht und Kosten reduziert. Zur Reduktion der Betriebskosten und zur besseren Planbarkeit von Wartungsintervallen werden Systeme zur Strukturüberwachung und Schadensbewertung entwickelt. Die Betriebslasten werden zukünftig über formvariable Hinterkantenklappen und Biege-Torsionskopplung verringert. Durch zusätzliche Integration von Funktionalitäten in den Werkstoff können Rotorblätter zukünftig nicht nur kostenoptimiert hergestellt werden, es werden auch Lebenserwartung und Energieausbeute gesteigert. Hierzu tragen auch Entwicklungen hin zu einer qualitätsgesteuerten Produktion bei. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit anderen DLR-Instituten ermöglicht dabei eine effiziente Bewertung und den Vergleich neuer Bauweisen.



Geschäftsfeldleiterin:  
Wibke Exner, M.Sc.



# Veröffentlichungen 2017–2018

*Publications 2017–2018*

## Ausgewählte Veröffentlichungen in Büchern und Fachzeitschriften

**Petersen, Enno; Stefaniak, Daniel; Hühne, Christian (2017):** Experimental investigation of load carrying mechanisms and failure phenomena in the transition zone of locally metal reinforced joining areas. *Composite Structures*, 182, Seiten 79-90. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.002 ISSN 0263-8223.

**Rehbein, Johannes; Wierach, Peter; Gries, Thomas; Wiedemann, Martin (2017):** Improved electrical conductivity of NCF-reinforced CFRP for higher damage resistance to lightning strike. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing* (100), Seiten 352-360. Elsevier. ISSN 1359-835X.

**Schollerer, Martin; Kosmann, Jens; Löbel, Thomas; Holzhüter, Dirk; Hühne, Christian (2017):** A New Joining-Device for Manufacturing Tubular Butt Joints with Higher Curing Temperatures of Film Adhesives. *Applied Adhesion Science*, 5 (15). Springer. DOI: 10.1186/s40563-017-0094-8 ISSN 2196-4351.

**Haase, Thomas; Bühmann, Henning; Radestock, Martin; Monner, Hans Peter (2017):** Experimental Realization of a Sound Radiation Filter for Feedforward Control to Improve Active Structural Acoustic Control Systems. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 1 (2), Seiten 455-463. Society of Automotive Engineers (SAE) International. DOI: 10.4271/2017-01-1830 ISSN 2380-2162.

**Heinze, Christoph; Duczek, Sascha; Sinapius, Michael; Wierach, Peter (2017):** A Minimal Model-Based Approach for the Fast Approximation of Wave Propagation in Complex Structures. *Structural Health Monitoring*, 16 (5), Seiten 568-582. SAGE Publications. DOI: 10.1177/1475921717697509 ISSN 1475-9217.

**Krone, Jan-Hendrik; Huxdorf, Oliver; Riemenschneider, Johannes; Monner, Hans Peter; Schur, Fabian; Friedrichs, Jens; Wiedemann, Martin (2017):** Experimental Investigation and design of a shape-variable compressor cascade. *CEAS Aeronautical Journal*, Seiten 105-127. Springer. ISSN 1869-5590.

**Niemann, Steffen; Wagner, Ronald; Beerhorst, Matthias; Hühne, Christian (2017):** Testing and analysis of anisogrid prepreg element specimens under uniaxial tension and compression. *Composite Structures*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.100> ISSN 0263-8223, 2017.

**Abramovich, Haim; Wagner, Ronald; Hühne, Christian; Niemann, Steffen (2017):** Stability and Vibrations of Thin Walled Composite Structures. *Stability and Vibrations of Thin-Walled Composite Structures*, 1. Woodhead Publishing. ISBN 9780081004296.

**Da Ronch, Andrea; Yongchao, Li; Zhang, Lu; De Breuker, Roeland; Kirn, Johannes; Storm, Stefan; Daochun, Li; Monner, Hans Peter; Kintscher, Markus (2017):** A Review of Modelling and Analysis of Morphing Wings. *Progress in Aerospace Sciences*. Elsevier. ISSN 0376-0421.

**Demmerling, Anna Lena ; Schlindwein, Hans Jürgen; Geier, Sebastian; Mahrholz, Thorsten (2017):** Untersuchung der Wechselwirkung von CFK mit Kühlschmierstoffen. *Lightweight Design*, 10 (4), Seiten 10-15. Springer. ISSN 1865-4819.

**Gardner, Anthony und Opitz, Steffen und Wolf, Christian und Merz, Christoph B. (2017):** Reduction of dynamic stall using a back-flow flap. *CEAS Aeronautical Journal*, Seiten 271-286. Springer. DOI: 10.1007/s13272-017-0237-4 ISSN 1869-5590.

**Misol, Malte; Titze, Maik; Monner, Hans Peter (2017):** Control of the sound radiation of grid panels with active-passive-hybrid methods. In: *SFB 880 - Fundamentals of high-lift for future commercial aircraft*, Biennial Report Technische Universität Braunschweig. Seiten 197-205. ISBN 9783928628907.

**Raddatz, Florian und Szewieczek, Artur und Sinapius, Michael (2017):** Experimental Methods. In: *Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites* Springer. Seiten 91-111. ISBN 978-3-319-49714-391. ISSN 2194-8240.

**Neuhaus, Lars; Singh, Piyush; Homeyer, Tim; Huxdorf, Oliver; Riemenschneider, Johannes; Wild, Jochen; Peinke, Joachim; Hölling, Michael (2018):** Mitigating loads by means of an active slat. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037, Seiten 1-8. Institute of Physics (IOP) Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1037/2/022032 ISSN 1742-6588.

**Bogenfeld, Raffael Marius; Kreikemeier, Janko; Wille, Tobias (2018):** Review and benchmark study on the analysis of low-velocity impact on composite laminates. *Engineering Failure Analysis*, 87 (87), Seiten 72-99. Elsevier. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.12.019 ISSN 1350-6307.

**Schmidt, Stefan; Mahrholz, Thorsten; Kühn, Alexandra; Wierach, Peter (2018):** Powder binders used for the manufacturing of wind turbine rotor blades. Part 1: Characterisation of resin-binder interaction and preform properties. *Polymer Composites*, 39 (3), Seiten 708-717. Wiley. DOI: 10.1002/polb.23988 ISSN 0272-8397.

**Adam, Till Julian; Liao, Guangyue; Petersen, Jan; Geier, Sebastian; Finke, Benedikt; Wierach, Peter; Kwade, Arno; Wiedemann, Martin (2018):** Multifunctional Composites for Future Energy Storage in Aerospace Structures. *Energies*, 11 (2), Seite 335. MDPI AG. DOI: 10.3390/en11020335 ISSN 1996-1073.

**Bach, Tobias; Hühne, Christian (2018):** Structural Optimization of Stiffened Composite Panels for Highly Flexible Aircraft Wings. In: *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization* Springer International Publishing AG. ISBN 978-3-319-67988-4.

**Geier, Sebastian; Mahrholz, Thorsten; Wierach, Peter; Sinapius, Michael (2018):** Morphology- and Ion Size-Induced Actuation of Carbon Nanotube Architectures. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 9 (1). Taylor & Francis. DOI: 10.1080/19475411.2018.1457573 ISSN 1947-5411.

**Heinecke, Falk; Wille, Tobias (2018):** In-situ structural evaluation during the fibre deposition process of composite manufacturing. *CEAS Aeronautical Journal*. Springer. DOI: 10.1007/s13272-018-0284-5 ISSN 1869-5582.

**Vasista, Srinivas; Nolte, Felix; Monner, Hans Peter; Horst, Peter (2018):** Three-dimensional Design of a Large-Displacement Morphing Wing Droop Nose Device. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. SAGE Publications. DOI: 10.1177/1045389X18770863 ISSN 1045-389X.

**Wolf, Christian C.; Gardner, Anthony; Merz, Christoph B.; Opitz, Steffen (2018):** Influence of a back-flow flap on the dynamic stall flow topology. *CEAS Aeronautical Journal*, 9 (39), Seiten 39-51. Springer. DOI: 10.1007/s13272-017-0274-z ISSN 1869-5590

## Ausgesuchte Konferenzbeiträge

**Misol, Malte und Haase, Thomas und Algermissen, Stephan und Papantoni, Veatriki und Monner, Hans Peter (2017):** *Lärmreduktion in Flugzeugen mit aktiven Linings*. In: *Smarte Strukturen und Systeme*, Seiten 329–339. Shaker Verlag. Symposium für Smarte Strukturen und Systeme 4SMARTS, 21.–22.06.2017, Braunschweig, Deutschland. ISBN 978-3-8440-5083-7

**Torstrick-v.d.Lieth, Sven und Wiedemann, Martin und Stüve, Jan (2017):** Is Carbon Already Obsolete for Non-Super Sports Cars? *ADD-ITC 2017*, 30. Nov.-01. Dez. 2017, Stuttgart, Deutschland.

**Nguyen, Duy Chinh und Krombholz, Christian (2017):** Automated Fibre Placement Technologies for Glass Fibre Prepreg Layup in FML Components. *FML Outlook 2017*, 2.-3. Nov.2017, Delft, Niederlande.

**Liebers, Nico und Kleineberg, Markus und Wiedemann, Martin (2017):** Ultrasonic flow front, thickness and cure monitoring of liquid composite molding processes. *PFAM26*, 16.-19. Okt. 2017, Jeonju, Südkorea.

**Jahnke, Stephan Siegfried und Lange, Caroline und Mierheim, Olaf und Ksenik, Eugen und Rosta, Roland und Witte, Lars (2017):** Mechanical design of a modular experiment carrier for a terrestrial analog demo mission and its potential for future space exploration. In: *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. 68th International Astronautical Congress (IAC)*, 25.-29. Sep. 2017, Adelaide, Australien.

**Rädel, Martin und Odermann, Falk und Willberg, Christian und Wieland, Birgit (2017):** Development of a versatile structural test facility for wind rotor blade subcomponents. *13th EAWE PhD Seminar 2017*, 20-22 Sep 2017, Cranfield, UK.

**Boblentz, Johannes und Hühne, Christian (2017):** Development and Testing of woven GFRP Flexure Hinges for Pressure Actuated Cellular Structures (PACS). *ICCS20*, 04.-07. Sep. 2017, Paris, Frankreich.

**Kalow, Steffen und van de Kamp, Bram und Keimer, Ralf und Riemenschneider, Johannes (2017):** Experimental investigation and validation of structural properties of a new design for active twist rotor blades. *European Rotorcraft Forum 2017*, 12.09-15.09.2017, Mailand, Italien.

**Liao, Guangyue und Geier, Sebastian und Mahrholz, Thorsten und Wierach, Peter und Wiedemann, Martin (2017):** Carbon Nanotubes Modified Solid Electrolyte-Based Structural Supercapacitors and their Temperature Influence. In: *Proceedings of the SMASIS 2017. The American Society of Mechanical Engineering. SMASIS 2017 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures & Intelligent Systems*, 18.-20.09.2017, Snowbird, Utha, USA.

**Grohmann, Yannis und Stüve, Jan (2017):** CoRe HeaT - Continuous Resistance Heating Technology for fast and efficient high volume production processes. *28th SICOMP Conference on Manufacturing and Design of Composites*, 01. - 02. Juni 2017, Piteå, Sweden.

**Moix-Bonet, Maria und Eckstein, Benjamin und Bach, Martin und Wierach, Peter und Wiedemann, Martin (2017):** Damage Classification in Aeronautic Structures using Guided Waves. *International Workshop for Structural Health Monitoring*, 12-14 September 2017, Stanford University, California, USA.

**Kosmann, Jens und Klapp, Oliver und Holzhüter, Dirk und Schollerer, Martin und Fiedler, Arne und Nagel, Christoph und Hühne, Christian (2017):** Measurement of Epoxy Film Adhesive Properties in Torsion and Tension Using Tubular Butt Joints. *AB2017 – 4th International Conference on Structural Adhesive Bonding*, 06.-07. Juli 2017, Porto, Portugal.

**Uçan, Hakan und Nguyen, Duy Chinh und Krombholz, Christian und Nieberl, Dorothea und Akin, Deniz Nick (2017):** Advanced Production Technologies for High Performance FML Parts. *CFK Valley State Convention 2017*, 16 – 17 May 2017, Stade, Germany.

**Willberg, Christian und Rädel, Martin (2017):** Potentials and Challenges utilizing Peridynamics. *Kolloquium des Graduiertenkollegs - Micro-Macro-Interactions in structured Media and Particle Systems*, Magdeburg.

**Petersen, Enno und Hühne, Christian (2018):** Determination of critical energy release rates for steel-cfrp interfaces considering residual thermal stresses. *European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing*, 28.Mai.-1. Juni 2018, Noordwijk, Niederlande.

**Heilmann, Lennert und Wierach, Peter und Wiedemann, Martin (2018):** Proofed Bonding - A Novel Method for Verifying Adhesion in Adhesively Bonded Composite Repairs. *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials*, 25.-28. Jun. 2018, Athen, Griechenland.

**Uçan, Hakan und Hesse, Jan-Timo und Kantelberg, Michael (2018):** Toasting CFRP parts - Cellular heatable tooling and infrared thermography assisted process time stabilisation of full scale CFRP parts in curing processes. *Lightweight Design in Product Development 2018*, 14.-15. Jun. 2018, Zürich, Schweiz.

**Meister, Sebastian (2018):** Concept for a tailor-made visual inline inspection system for fibre layup processes depending on material and process characteristics. *Lightweight Design in Product Development (LWD-PD)*, 13.-15. Juni 2018, Zürich, Schweiz.

**Riemenschneider, Johannes und Kletz, Björn Timo und Titze, Maik und Vasista, Srinivas und Kalow, Steffen und Delisle, Dominik und Stüve, Jan (2018):** Add-CompS - Where Additive Manufacturing and Composites blend in fusion. *17th INNOVATION DAY*, 16. Mai 2018, Stade.

**Holzhüter, Dirk und Löbel, Thomas und Hühne, Christian (2018):** The Adhesive Zone Mix Disbond Arrest Feature Results (EU-FP7 Project BOPACS). *AVT-266 Research Specialists’ Meeting on Use of Bonded Joints in Military Applications*, 15.-16.4.2018, Turin, Italien.

**Mendig, Christian und Pototzky, Alexander (2018):** Overview about the icing Research at the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems - Transfer to wind energy in cold climate possible? *WINTERWIND 2018*, 5.2-7.2.2018, Åre, Schweden.

**Neuhaus, Lars und Piyush, Singh und Huxdorf, Oliver und Riemenschneider, Johannes und Wild, Jochen und Peinke, Joachim und Hölling, Michael (2018):** Mitigating loads by means of an active slat. *Torque 2018*, 20.-22. Juni 2018, Mailand.

**Pohl, Martin und Riemenschneider, Johannes (2018):** Designing and testing a flexible trailing edge for wind energy turbine blades. *AIAA SciTech Forum and Exposition*, 08.-12. Jan. 2018, Kissimmee, Florida USA.



# Neues Lehrbuch „Adaptronik“

New course book "Adaptronik"

Seit den Achtzigerjahren forschen Wissenschaftler an adaptiven Strukturen für Materialien, für multifunktionale Elemente oder sogar für vollständige Systeme. Dabei ist die Adaptronik (englisch: smart materials, smart structures, smart systems) ein Fachgebiet von ausgeprägter Interdisziplinarität. Das Buch bietet daher eine interdisziplinäre Betrachtung von adaptronischen Systemen, Werkstoffen und Funktionselementen und ihren Anwendungen.

Der Lehrstoff integriert verschiedene ingenieurwissenschaftliche Disziplinen, von Elektro- und Informationstechnik über Fertigungs- und Regelungstechnik bis zu Werkstofftechnik und Strukturmechanik – um nur einige der relevanten Fachgebiete zu nennen. Ausgehend von den grundlegenden Prinzipien und Varianten adaptronischer Systeme und Funktionswerkstoffe werden in dem Lehrbuch die unterschiedlichen Bauweisen von Funktionselementen erläutert.

Darauf aufbauend lernen Leser, wie diese Kenntnisse auf die aktive Formkontrolle, die aktive Vibrationskontrolle und die aktive Vibroakustik anzuwenden sind. Für jedes dieser Themenfelder stellt der Autor aktuelle Beispiele aus der Forschung vor, diskutiert Forschungsergebnisse und zukünftige Forschungsfragen. Jedes der neun Kapitel schließt mit Hinweisen auf weiterführende Literatur.

Ein Verzeichnis der verwendeten mathematischen Symbole und ein Stichwortverzeichnis erleichtern Lesern das Lernen. Das Buch wendet sich an Masterstudierende in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen wie Maschinenbau, Luft- und Raumfahrttechnik, Mechatronik, Kraftfahrzeugtechnik sowie verwandte Studiengänge. Praktikern in der Industrie, die sich in das Gebiet der Adaptronik einarbeiten wollen, bietet das Buch auf 488 Seiten einen umfassenden Überblick und es dient zugleich als ein zuverlässiges Nachschlagewerk.

Aus dem Inhaltsverzeichnis:

- 1 Einführung
- 2 Prinzip der Adaptronik
- 3 Funktionswerkstoffe
- 4 Adaptronische Funktionselemente
- 5 Aktive Formkontrolle
- 6 Aktive Vibrationskontrolle
- 7 Regelung adaptiver Strukturen
- 8 Aktive Schallbeeinflussung
- 9 Integrierte Bauteilüberwachung

Das Lehr- und Fachbuch dient der Ausbildung in forschungsorientierten Studiengängen des Maschinenbaus und bietet dafür eine interdisziplinäre und systematische Darstellung der Adaptronik. Das Buch integriert viele Beispiele aus der aktuellen Forschung des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR und des Instituts für Adaptronik und Funktionsintegration der TU Braunschweig.



## Summary

*Adaptronics is a comparatively new discipline in engineering, which is characterized by pronounced interdisciplinarity. The book "Adaptronik" therefore offers an interdisciplinary view of adaptronic systems. Starting from the basic principles and variants of adaptronic systems and functional materials, the various functional elements are explained to the reader. Afterwards, the knowledge gained in active shape control, active vibration control and active vibroacoustics is applied and deepened. Here a focus is placed on current examples from research.*

Autor:  
Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius



# Patente 2017–2018

Patents 2017–2018

**Haase, Thomas; Unruh, Oliver:**  
Schalldämpfende Wand mit einem Fensterkomplex und Flugzeug mit einer solchen Wand, DE 102016116554, 08.09.2017

**Keck, Rüdiger; Ückert, Christian; Gerngroß, Tobias; Bartsch, Ivonne; Nickel, Jörg; Hühne, Christian:**  
Luftfrachtcontainer "Projekt ULD-Container", DE 10201105488.1, 09.10.2017

**Staryh, Viktor; Grote, Matthias; Schmidt, Jochen; Kleineberg, Markus:**  
Verfahren und Vorrichtung zur Montage von Bauteilen, DE 102014100780, 12.10.2017

**Krombholz, Christian:**  
Faserlegevorrichtung, DE 102014102278.5, 12.10.2017

**Liebers, Nico; Kühn, Michael; Hindersmann, Arne:**  
Ultraschallmessverfahren und -vorrichtung, insbesondere zur Aushärtungsüberwachung und Laminatdickenbestimmung bei der Faserverbundteillfertigung, DE 102010037981.6, 06.11.2017

**Beyland, Lutz:**  
Faserverbundbauteil, Faserverbundstruktur und Herstellung derselben, DE 102016123346.3, 07.11.2017

**Schmidt, Jochen; Kleineberg, Markus:**  
Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Faserverbundbauteils, DE 102015108338, 16.11.2017

**Assing, Heiko; Stahl, Arne; Hühne, Christian; Borgwardt, Henrik:**  
Formwerkzeug, DE 102011110206, 17.11.2017

**Kleineberg, Markus; Schmidt, Jochen:**  
Faserverbundbauteil sowie Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils, DE 102014112951, 23.11.2017

**Hilmer, Philipp; Opitz, Mark:**  
Flexibles Formwerkzeug, DE 1020120101704, 04.12.2017

**Kappel, Erik:**  
Verformungsanalyse, FR 2992725, 08.12.2017

**Hühne, Christian; Bold, Jens; Ückert, Christian; Steffen, Olaf:**  
Composant de corps d'écoulement, FR 1363192, 22.12.2017

**Beyland, Lutz:**  
Faserverbundbauteil, Faserverbundstruktur und Herstellung derselben, DE 102016123346.3, 28.12.2017

**Bold, Jens; Steffen, Olaf; Ückert, Christian; Hühne, Christian:**  
Integrale Verstärkungselemente, DE 102012109231, 04.01.2018

**Keck, Rüdiger; Gerngroß, Tobias; Ückert, Christian; Bartsch, Ivonne; Hühne, Christian; Nickel, Jörg:**  
Luftfrachtcontainer "Projekt ULD-Container", DE 10201105488.1, 25.01.2018

**Kühn, Michael; Liebers, Nico; Hindersmann, Arne:**  
Ultraschallmessverfahren und -vorrichtung, insbesondere zur Aushärtungsüberwachung und Laminatdickenbestimmung bei der Faserverbundteillfertigung, DE 102010037981.6, 22.02.2018

**Stahl, Arne; Hühne, Christian; Assing, Heiko; Borgwardt, Henrik:**  
Formwerkzeug, DE 102011110206, 08.03.2018

**Opitz, Mark; Hilmer, Philipp:**  
Flexibles Formwerkzeug, DE 1020120101704, 22.03.2018

**Perner, Marcus:**  
Faser-legevorrichtung, FR 3003796, 26.03.2018

**Krombholz, Christian; Perner, Marcus; Röstermundt, Dirk; Bock, Matthias Bock:**  
Fertigungsanlage, FR 3014722, 26.03.2018

**Melcher, Jörg; Kletz, Björn:**  
Verfahren zum separierten Erfassen von Störgrößen, DE 102016103579.3, 28.03.2018

**Wiedemann, Martin; Kreikemeier, Janko; Schmidt, Daniel:**  
Verfahren und Verbindung zum Fügen zweier Bauelemente, DE 102017103895, 11.04.2018

**Al-Lami, Ali; Wolff, Johannes:**  
Faserverbundbauteil und dessen Herstellung, DE 102016121550, 26.04.2018

**Bölke, Jens; Malzahn, Sebastian; Hanke, Michael; Uçan, Hakan:**  
Herstellung eines Faserverbundbauelementes, ES 2567805, GB 2567805, DE 2567805, FR 2567805, 02.05.2018

**Hühne, Christian; Borgwardt, Henrik; Stahl, Arne:**  
Herstellung gekrümmter Preformen, DE 502015004372.5, ES 3110603, SE 3110603, AT 3110603, FR 3110603, GB 3110603, NL 3110603, IT 3110603, 23.05.2018

**Wurl, Thomas; Wieland, Birgit Ulrike:**  
Mehrteilige Vakuumhaube, DE 102014111358, 24.05.2018

**Fink, Axel; Hühne, Christian:**  
Wellenkupplung, DE 102011014167, 11.06.2018

**Haase, Thomas; Unruh, Oliver; Misol, Malte; Algermissen, Stephan; Pohl, Martin; Rose, Michael:**  
Schalldämmungssystem, DE 102013102612, 13.06.2018

**Perner, Marcus:**  
Ablegekopf zum Ablegen von Fasermaterial, FR 3011499, 15.06.2018

**Opitz, Mark:**  
Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils, DE 102013105940, 21.06.2018

**Pohl, Martin; Algermissen, Stephan; Perner, Marcus:**  
Faserlegekopf zum Ablegen von Fasermaterial und Verfahren hierzu, DE 102015114003, 21.06.2018

**Fink, Axel; Hühne, Christian:**  
Wellenkupplung, DE 102011117298, 22.06.2018

**Heilmann, Lennert:**  
Vorrichtung zur Erzeugung von Abreißlaschen an Klebfilmenden, DE 202017101510, 26.06.2018

**Perner, Marcus:**  
Formwerkzeug mit aktiver Lagerung, DE 102013111582, 05.07.2018

**Borgwardt, Henrik; Stahl, Arne:**  
Anlage und Verfahren zur Herstellung einer gekrümmten, mehrlagigen Preform aus Fasern eines Faserverbundwerkstoffes, DE 102015109864, 05.07.2018



## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 20 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Bremerhaven, Dresden, Göttingen, Hamburg, Jena, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Oldenburg, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 8.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C.

### *DLR at a glance*

*DLR is the national aeronautics and space research centre of the Federal Republic of Germany. Its extensive research and development work in aeronautics, space, energy, transport and security is integrated into national and international cooperative ventures. In addition to its own research, as Germany's space agency, DLR has been given responsibility by the federal government for the planning and implementation of the German space programme. DLR is also the umbrella organisation for the nation's largest project management agency.*

*DLR has approximately 8000 employees at 20 locations in Germany: Cologne (headquarters), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Bremerhaven, Dresden, Goettingen, Hamburg, Jena, Juelich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Oldenburg, Stade, Stuttgart, Trauen, and Weilheim. DLR also has offices in Brussels, Paris, Tokyo and Washington D.C.*

## Impressum | Imprint

### Herausgeber | Publisher:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) | *German Aerospace Center (DLR)*  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik | *Institute of Composite Structures and Adaptive Systems*

Redaktion | *Editorial staff*: Prof. Dr. Martin Wiedemann (Direktor), Jana Hoidis (Redaktionsleitung),  
Prof. Dr. Peter Wierach, Prof. Dr. Jörg Melcher, Dr. Matthias Lossau,  
Christin Herrmann

### Anschrift | Address:

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig  
Telefon | *Phone* + 49 531 295-2301

### DLR.de/FA

ISSN (Print) 2567-7705, ISSN (Online) 2567-7713

Bilder | *Images*: DLR Fotomedien, Timm Bourry, Evi Blink, | *Copyright*: DLR (CC-BY 3.0),  
soweit nicht anders angegeben | *unless otherwise stated*

### Titelbild | Cover image:

Vision: (Fern-)Bedienung der Forschungsanlage über ihren digitalen Zwilling, S. 74

*Vision: (Remote) control of research platform by digital twin, p. 74*



**Deutsches Zentrum  
DLR für Luft- und Raumfahrt**  
German Aerospace Center

### Supported by:



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Energy

on the basis of a decision  
by the German Bundestag

### Projects supported by:



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Energy



Federal Ministry  
of Defence

